



**ITS**  
Institut  
Teknologi  
Sepuluh Nopember

**TUGAS AKHIR - TE141599**

**ANALISA KESTABILAN TRANSIEN DAN MEKANISME  
PELEPASAN BEBAN PADA PT. ANEKA TAMBANG POMALAA**

Indra Setiono  
NRP 2210 100 009

Dosen Pembimbing  
Dr. Ir. Margo Pujiantara, MT.  
Dr. Eng. Ardyono Priyadi, ST., M.Eng.

JURUSAN TEKNIK ELEKTRO  
Fakultas Teknologi Industri  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember  
Surabaya 2015



**ITS**  
Institut  
Teknologi  
Sepuluh Nopember

**FINAL PROJECT - TE141599**

**TRANSIENT STABILITY ANALYSIS AND LOAD SHEDDING  
MECHANISM AT PT. ANEKA TAMBANG POMALAA**

Indra Setiono  
NRP 2210 100 009

Advisor  
Dr. Ir. Margo Pujiانتara, MT.  
Dr. Eng. Ardyono Priyadi, ST., M.Eng.

DEPARTEMENT OF ELECTRICAL ENGINEERING  
Faculty of Industrial Technology  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember  
Surabaya 2015

**ANALISA KESTABILAN TRANSIEN DAN  
MEKANISME PELEPASAN BEBAN PADA  
PT. ANEKA TAMBANG POMALAA**

**TUGAS AKHIR**

**Diajukan Guna Memenuhi Sebagian Persyaratan  
Untuk Memperoleh Gelar Sarjana Teknik  
Pada  
Bidang Studi Teknik Sistem Tenaga  
Jurusan Teknik Elektro  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember**

**Menyetujui:**

**Dosen Pembimbing I,**

**Dosen Pembimbing II,**

**Dr. Ir. Margo Pujiyantara, MT.**  
**NIP. 196603181990101001**

**Dr. Eng. Ardyono Privadi, ST., M.Eng.**  
**NIP. 197309271998031004**

**SURABAYA  
JANUARI, 2015**

# **ANALISA KESTABILAN TRANSIEN dan MEKANISME PELEPASAN BEBAN pada PT. ANEKA TAMBANG POMALAA**

**Nama : Indra Setiono**  
**NRP : 2210 100 009**  
**Pembimbing I : Dr. Ir. Margo Pujiantara, MT.**  
**Pembimbing II : Dr. Eng. Ardyono Priyadi, ST., M.Eng.**

## **ABSTRAK**

PT. Aneka Tambang (PT. ANTAM) merupakan badan usaha milik negara (BUMN) yang bergerak dalam bidang eksplorasi, pertambangan, pengolahan serta pemasaran dari sumber daya mineral. PT. Antam memiliki pembangkitan sebesar 10x5805 kW dan 8x17076 kW. Kemudian ditambahkan generator sebesar 2x31875 kW. Namun pada konfigurasi sistem yang baru generator sebesar 10x5805 kW tidak dioperasikan dan karena telah digantikan dengan pembangkit tenaga uap sebesar 2x31875 kW sehingga menyebabkan perubahan konfigurasi sistem kelistrikan. Dalam tugas akhir ini akan dilakukan studi kestabilan transien dari sistem kelistrikan PT. Aneka Tambang. Beberapa gangguan transien yang akan dijadikan studi kasus dalam tugas akhir ini adalah gangguan generator *outage*, hubung singkat dan motor *starting*. Ketiga jenis gangguan tersebut akan memberikan gambaran mengenai kehandalan sistem kelistrikan terhadap gangguan transien. Tugas akhir ini memfokuskan pada mekanisme *load shedding* sebagai solusi terhadap berbagai jenis gangguan yang digunakan sebagai studi kasus. Program yang digunakan untuk melakukan analisis adalah ETAP 11. Hasil simulasi yang didapatkan pada tugas akhir ini akan dianalisis dan kemudian baru melakukan perancangan mekanisme *load shedding* yang sesuai. Terdapat dua jenis *load shedding* yang digunakan yaitu frekuensi dan status. Apabila dibandingkan kedua jenis *load shedding* ini maka jenis *load shedding* status dapat membuat sistem lebih cepat stabil daripada *load shedding* frekuensi. Kasus hubung singkat pada bus 00AHC20 (30 kV) memerlukan skema *load shedding* karena terlepasnya generator STG-2G pada saat terjadi hubung singkat.

**Kata Kunci :** kestabilan transien, *load shedding*, gangguan transien

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

# **TRANSIENT STABILITY ANALYSIS AND LOAD SHEDDING MECHANISM AT PT. ANEKA TAMBANG POMALAA**

**Name : Indra Setiono**  
**NRP : 2210 100 009**  
**Advisor I : Dr. Ir. Margo Pujiantara, MT.**  
**Advisor II : Dr. Eng. Ardyono Priyadi, ST., M.Eng.**

## **ABSTRACT**

*PT . Aneka Tambang (PT. ANTAM) is one of State Owned Enterprise ( BUMN ) which engaged in the field of mining, exploration and mineral marketing. PT.ANTAM formerly possessing power generation of 10x5805 kw and 8x17076 kw and currently has been added a new generator of 2x31875 kw . But in this configuration the generator of 10x5805 kw that is the power generators diesel generators to be replaced with steam power of 2x31875 kw thus causing changes in system configuration . So in this study will be held a transient stability analysis of electrical system of PT. Aneka tambang . A transient stability disturbance that will be used as a study cases are generator outage , short circuit and motor starting .These three types of the disturbance will give an overview of performance of electric system against a transient disturbance. The end of it focuses duty is to give the mechanism of load shedding as a solutions to various kinds of disturbance that used as case studies .A program used to do the analysis is ETAP 11 . The Simulation results obtained on this final project will be analyzed and then doing the design mechanism of load shedding is appropriate. There are two types of load shedding used IE frequency and status. When compared both types of load shedding the type of load shedding status can make a faster system stable than the frequency load shedding. Short Circuit on bus 00AHC20 ( 30 kv ) requires load shedding scheme because the generator STG-2G was forcibly off due to bus fault.*

**Keywords:** transient stability, load shedding, transient disturbance

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

## KATA PENGANTAR

Puji syukur saya panjatkan terhadap Tuhan Yang Maha Esa, atas berkat dan rahmat-Nya, buku tugas akhir ini dapat terselesaikan dengan baik.

Adapun tujuan dari penyusunan tugas akhir ini adalah untuk menyelesaikan salah satu persyaratan untuk mendapatkan gelar sarjana teknik pada bidang studi Teknik Sistem Tenaga, Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya.

Dalam kesempatan ini penulis ingin mengucapkan terima kasih kepada pihak-pihak yang banyak berjasa terutama dalam penyusunan tugas akhir ini, yaitu :

1. Segenap keluarga tercinta, Mama (Wiji Purwani) yang selalu memberikan dukungan, semangat, dan doa untuk keberhasilan penulis.
2. Bapak Dr. Ir. Margo Pujiantara, MT dan Bapak Dr.Eng. Ardyono Priyadi, ST., M.Eng. selaku dosen pembimbing yang telah banyak memberikan saran serta bimbingannya. Serta Mas Wahyu dan Mas Andikta selaku mahasiswa yang membimbing saya selama pengerjaan tugas akhir ini.
3. Seluruh rekan Gap-Kerah Bimo, Aldi, Bison, Chapid, Eng, Haris, Aji, Mada, Auk, Fiko dan grafiz, Bara, Wildan dan lainnya atas kebersamaan yang luar biasa selama 4 tahun ini. Serta peliharaan saya bernama Miki atas hiburannya.
4. Seluruh keluarga besar Teknik Elektro ITS, sahabat-sahabat angkatan E-50 (2010) atas dukungan, masukan, dan kerjasamanya selama masa kuliah dan proses pengerjaan tugas akhir.

Besar harapan penulis agar tugas akhir ini dapat memberikan manfaat dan masukan bagi banyak pihak. Oleh karena itu penulis mengharapkan kritik, koreksi, dan saran dari pembaca yang bersifat membangun untuk pengembangan ke arah yang lebih baik.

Surabaya, Desember 2014

Penulis



*Halaman ini sengaja dikosongkan*

# DAFTAR ISI

	HALAMAN
<b>JUDUL</b>	
<b>LEMBAR PERNYATAAN</b>	
<b>LEMBAR PENGESAHAN</b>	
<b>ABSTRAK</b> .....	i
<b>ABSTRACT</b> .....	iii
<b>KATA PENGANTAR</b> .....	v
<b>DAFTAR ISI</b> .....	vii
<b>DAFTAR GAMBAR</b> .....	xi
<b>DAFTAR TABEL</b> .....	xv

## BAB I

### PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang Masalah .....	1
1.2 Permasalahan .....	2
1.3 Tujuan .....	2
1.4 Metodologi .....	2
1.5 Sistematika .....	5
1.6 Relevansi .....	5

## BAB II

### DASAR TEORI

2.1 Pengertian Kestabilan Sistem Tenaga Listrik .....	7
2.1.1. Kestabilan Steady State .....	8
2.1.2. Kestabilan Transien .....	8
2.1.3. Kestabilan Dinamis .....	9
2.2 Klasifikasi Kestabilan Pada Sistem Tenaga Listrik .....	8
2.1.1. Kestabilan Sudut Rotor .....	10
2.1.2. Kestabilan Frekuensi .....	10
2.1.3. Kestabilan Tegangan .....	11
2.3 Hubungan Daya dengan Sudut Rotor .....	11
2.3.1 Dinamika Rotor dan Persamaan Ayunan .....	14
2.4 Pengaturan Frekuensi .....	17
2.5 Kejadian Yang Mempengaruhi Kestabilan .....	20
2.4.1 <i>Motor Starting</i> .....	20
2.4.2 Generator Lepas .....	20

2.4.3	Perubahan Beban .....	20
2.4.4	Gangguan Hubung Singkat.....	21
2.6	Sistem Pelepasan Beban ( <i>Load Shedding</i> ).....	21
2.6.1	Pelepasan Beban secara Manual .....	23
2.6.2	Pelepasan Beban secara Otomatis.....	23
2.7	Standar Untuk Analisa Kestabilan Transien .....	24
2.7.1	Standar Frekuensi .....	25
2.7.2	Standar Tegangan .....	26
2.7.3	Standar Pelepasan Beban .....	26

### **BAB III**

#### **SISTEM KELISTRIKAN PADA PT. ANEKA TAMBANG POMALAA**

3.1	Sistem Kelistrikan di PT. Aneka Tambang Pomalaa .....	29
3.2	Data Kelistrikan PT. Aneka Tambang Pomalaa .....	29
3.2.1	Jumlah Total Pembangkitan, Pembebanan, dan Permintaan PT. Aneka Tambang Pomalaa .....	29
3.3	Sistem Pembangkitan dan Distribusi PT. Aneka Tambang .....	31
3.3.1	Pembangkitan PT. Aneka Tambang Pomalaa.....	31
3.3.2	Sistem Distribusi.....	35
3.3.3	Data Beban dan Data Motor Terbesar .....	35

### **BAB IV**

#### **ANALISIS KESTABILAN TRANSIEN PADA PT. ANEKA TAMBANG POMALAA**

4.1	Analisis Kestabilan Transien .....	37
4.2	Pemilihan Studi Kasus.....	38
4.2.1	<i>Generator Outage</i> .....	38
4.2.2	<i>Short Circuit</i> .....	40
4.2.3	Motor Starting.....	41
4.3	Hasil Simulasi Kestabilan Transien dan Mekanisme Load shedding.....	44
4.3.1	Studi Kasus Generator G11 Lepas.....	44
4.3.2	Studi Kasus Generator STG-2G Lepas .....	46
4.3.2.1	Studi Kasus Generator STG-2G Lepas dan Load Shedding.....	49
4.3.3	Studi Kasus Generator G11 dan G18 Lepas .....	52
4.3.3.1	Studi Kasus Generator G11 dan G18 Lepas dan Load Shedding.....	56

4.3.4	Studi Kasus Generator G11 dan STG-2G Lepas .....	59
4.3.4.1	Studi Kasus Generator G11 dan STG-2G Lepas dan Load Shedding .....	62
4.3.4.2	Studi Kasus Generator G11 dan STG-2G Lepas dan Load Shedding Tahap 2 .....	65
4.3.4.3	Studi Kasus Generator G11 dan STG-2G Lepas Load Shedding Status .....	68
4.3.5	Studi Kasus Generator STG-1G dan STG-2G Lepas .....	72
4.3.5.1	Studi Kasus Generator STG-1G dan STG-2G Lepas dan Load Shedding .....	75
4.3.5.2	Studi Kasus Generator STG-1G dan STG-2G Lepas dan Load Shedding tahap 2 .....	78
4.3.5.3	Studi Kasus Generator STG-1G dan STG-2G Lepas dan Load Shedding tahap 3 .....	81
4.3.5.4	Studi Kasus Generator STG-1G dan STG-2G Lepas Load Shedding Status .....	86
4.3.6	Studi Kasus Short Circuit Pada Bus 00AHC20 (30KV) .....	89
4.3.6.1	Studi Kasus Short Circuit Pada Bus 00AHC20 (30KV) dan Load Shedding .....	93
4.3.7	Studi Kasus Short Circuit Pada Bus PP-2 (6.6KV) .....	98
4.3.8	Studi Kasus Short Circuit Pada Bus 00BFA (0.4KV) .....	101
4.3.9	Studi Kasus Motor M-BFP1A (930 kW) Start .....	105

## **BAB V**

### **PENUTUP**

5.1	Kesimpulan .....	109
5.2	Saran .....	110

<b>DAFTAR PUSTAKA</b> .....	111
-----------------------------	-----

<b>RIWAYAT HIDUP PENULIS</b> .....	113
------------------------------------	-----

<b>LAMPIRAN</b> .....	115
-----------------------	-----

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

## DAFTAR TABEL

### HALAMAN

Tabel 2.1	Skema Pelepasan Beban Tiga Langkah Sistem 60 Hz.....	27
Tabel 2.2	Skema Pelepasan Beban Enam Langkah Sistem 60 Hz.....	28
Tabel 2.3	Skema Pelepasan Beban Tiga Langkah Sistem 60/50 Hz .....	28
Tabel 3.1	Jumlah Total Pembangkitan, Pembebanan, dan Permintaan PT. Aneka Tambang Pomalaa .....	29
Tabel 3.2	Data Generator Pada PT.Aneka Tambang Pomalaa .....	31
Tabel 3.3	Data Generator Pada PT.Aneka Tambang Pomalaa (Lanjutan) .....	32
Tabel 3.4	Setting Exciter Generator Tipe AC8B .....	33
Tabel 3.5	Setting Governor Generator Tipe Woodward 2301 Pada Generator 17 MW .....	33
Tabel 3.6	Setting Governor Generator Tipe 505 Pada Generator 32 MW .....	34
Tabel 3.7	Setting Transformator pada PT.Aneka Tambang Pomalaa .....	35
Tabel 3.8	Data Motor Terbesar Pada PT.Aneka Tambang Pomalaa .....	36
Tabel 4.1	Studi Kasus Kestabilan Transien .....	43

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

# DAFTAR GAMBAR

## HALAMAN

Gambar 1.1	Diagram Alir Metodologi Pelaksanaan Studi.....	4
Gambar 2.1	Klasifikasi Kestabilan Pada Sistem Tenaga Listrik Berdasarkan IEEE .....	9
Gambar 2.2	Diagram Reaktansi Sistem Dua Mesin.....	12
Gambar 2.3	Kurva Daya dan Sudut Daya Saat Terjadi Gangguan .	13
Gambar 2.4	Blok Diagram Konsep Dasar Speed Governing .....	19
Gambar 2.5	Perubahan Frekuensi Sebagai Fungsi Waktu Dengan Adanya Pelepasan Beban .....	22
Gambar 2.6	Standar Batas Operasi Frekuensi Untuk Turbin Uap ..	25
Gambar 2.7	Standar Batas Operasi Tegangan Berdasarkan IEEE 1159-1995 .....	26
Gambar 3.1	Single Line Diagram PT. Aneka Tambang Pomalaa Eksisting Yang Telah disederhanakan .....	30
Gambar 3.2	Kurva Karakteristik Torsi-Kecepatan Pada Motor <i>Boiler Feed Water Pump</i> .....	36
Gambar 4.1	Respons Frekuensi Pada Kasus G11 Lepas.....	44
Gambar 4.2	Respons Tegangan Pada Kasus G11 Lepas.....	45
Gambar 4.3	Respons Sudut Rotor Pada kasus G11 lepas .....	46
Gambar 4.4	Respon Frekuensi Pada Studi Kasus STG-2G Lepas. .	47
Gambar 4.5	Respon Tegangan Pada Studi Kasus STG-2G Lepas ..	48
Gambar 4.6	Respon Sudut Rotor Pada Studi Kasus STG-2G Lepas .....	48
Gambar 4.7	Respons Frekuensi Pada Kasus STG-2G Lepas dan Load Shedding .....	50
Gambar 4.8	Respons Tegangan Pada Kasus STG-2G Lepas dan Load Shedding. ....	50
Gambar 4.9	Respon Sudut Rotor Pada Kasus STG-2G Lepas dan Load Shedding .....	51
Gambar 4.10	Perbandingan Frekuensi pada Kasus STG-2G Lepas..	52
Gambar 4.11	Respons Frekuensi Pada Kasus G11 dan G18 Lepas .	53
Gambar 4.12	Respons Tegangan Pada Kasus G11 dan G18 Lepas ..	54
Gambar 4.13	Respons Sudut Rotor Pada Kasus G11 dan G18 Lepas .....	55
Gambar 4.14	Respons Frekuensi Pada Kasus G11 dan G18 Lepas dan Load Shedding.....	56



Gambar 4.15	Respons Tegangan Pada Kasus G11 dan G18 Lepas dan Load Shedding .....	57
Gambar 4.16	Respons Sudut Rotor Pada Kasus G11 dan G18 Lepas dan Load Shedding.....	57
Gambar 4.17	Perbandingan Frekuensi Pada Kasus G11 dan G18 Lepas.....	58
Gambar 4.18	Respons Frekuensi Padat Kasus G11 dan STG-2G Lepas.....	59
Gambar 4.19	Respons Tegangan Pada Kasus G11 dan STG-2G Lepas.....	60
Gambar 4.20	Respons Sudut Rotor Pada Kasus G11 dan STG-2G Lepas.....	61
Gambar 4.21	Respons Frekuensi Pada Kasus G11 dan STG-2G Lepas dan Load Shedding.....	62
Gambar 4.22	Respons Tegangan Pada Kasus G11 dan STG-2G Lepas dan Load Shedding.....	63
Gambar 4.23	Respons Sudut Rotor Pada Kasus G11 dan STG-2G Lepas dan Load Shedding.....	64
Gambar 4.24	Respons Frekuensi Pada Kasus G11 dan STG-2G Lepas dan Load Shedding Tahap.....	65
Gambar 4.25	Respons Tegangan Pada Kasus G11 dan STG-2G Lepas dan Load Shedding Tahap 2.....	66
Gambar 4.26	Respons Sudut Rotor Pada Kasus G11 dan STG-2G Lepas dan Load Shedding Tahap 2.....	67
Gambar 4.27	Perbandingan Frekuensi Pada Kasus G11 dan STG-2G Lepas.....	68
Gambar 4.28	Respons Frekuensi Pada Kasus G11 dan STG-2G Lepas Load Shedding Status.....	69
Gambar 4.29	Respons Tegangan Pada Kasus G11 dan STG-2G Lepas Load Shedding Status.....	70
Gambar 4.30	Respons Sudut Rotor Pada Kasus G11 dan STG-2G Lepas Load Shedding Status.....	71
Gambar 4.31	Perbandingan Frekuensi Pada Kasus G11 dan STG-2G Lepas.....	72
Gambar 4.32	Respons Frekuensi Pada Kasus STG-1G dan STG-2G Lepas.....	73
Gambar 4.33	Respons Tegangan Pada Kasus STG-1G dan STG-2G Lepas.....	74

Gambar 4.34	Respon Sudut Rotor Pada Kasus STG-1G dan STG-2G Lepas .....	74
Gambar 4.35	Respon Frekuensi Pada Kasus STG-1G dan STG-2G Lepas dan Load Shedding .....	76
Gambar 4.36	Respon Tegangan Pada Kasus STG-1G dan STG-2G Lepas dan Load Shedding .....	77
Gambar 4.37	Respon Sudut Rotor Pada Kasus STG-1G dan STG-2G Lepas dan Load Shedding .....	77
Gambar 4.38	Respon Frekuensi Pada Kasus STG-1G dan STG-2G Lepas dan Load Shedding Tahap 2 .....	79
Gambar 4.39	Respon Tegangan Pada Kasus STG-1G dan STG-2G Lepas dan Load Shedding Tahap 2 .....	80
Gambar 4.40	Respon Sudut Rotor Pada Kasus STG-1G dan STG-2G Lepas dan Load Shedding Tahap 2 .....	81
Gambar 4.41	Respon Frekuensi Pada Kasus STG-1G dan STG-2G Lepas dan Load Shedding Tahap 3 .....	82
Gambar 4.42	Respon Tegangan Pada Kasus STG-1G dan STG-2G Lepas dan Load Shedding Tahap 3 .....	83
Gambar 4.43	Respon Sudut Rotor Pada Kasus STG-1G dan STG-2G Lepas dan Load Shedding Tahap 3 .....	84
Gambar 4.44	Perbandingan Frekuensi Pada Kasus STG-1G dan STG-2G Lepas dan Load Shedding tahap 3 .....	85
Gambar 4.45	Respon Frekuensi Pada Kasus STG-1G dan STG-2G Lepas dan Load Shedding Status .....	86
Gambar 4.46	Respon Tegangan Pada Kasus STG-1G dan STG-2G Lepas dan Load Shedding Status .....	87
Gambar 4.47	Respon Sudut Rotor Pada Kasus STG-1G dan STG-2G Lepas dan Load Shedding Status .....	88
Gambar 4.48	Perbandingan Frekuensi Pada Kasus STG-1G dan STG-2G Lepas. ....	89
Gambar 4.49	Respon Frekuensi Pada Kasus <i>short circuit</i> Bus 00AHC20 .....	90
Gambar 4.50	Respon Tegangan Pada Kasus <i>short circuit</i> Bus 00AHC20 .....	91
Gambar 4.51	Respon Sudut Rotor Pada Kasus <i>short circuit</i> Bus 00AHC20 .....	92
Gambar 4.52	Respon Daya Mekanik Pada Kasus <i>short circuit</i> Bus 00AHC20 .....	93

Gambar 4.53	Respons Frekuensi Pada Kasus <i>short circuit</i> Bus 00AHC20 dan Load Shedding .....	94
Gambar 4.54	Respons Tegangan Pada Kasus <i>short circuit</i> Bus 00AHC20 dan Load Shedding .....	95
Gambar 4.55	Respons Sudut Rotor Pada Kasus <i>short circuit</i> Bus 00AHC20 dan Load Shedding .....	96
Gambar 4.56	Respons Daya Mekanik Pada Kasus <i>short circuit</i> Bus 00AHC20 dan Load Shedding .....	97
Gambar 4.57	Respons Frekuensi Pada Kasus <i>short circuit</i> Bus PP-2 .....	98
Gambar 4.58	Respons Tegangan Pada Kasus <i>short circuit</i> Bus PP-2 .....	99
Gambar 4.59	Respons Sudut Rotor Pada Kasus <i>short circuit</i> Bus PP-2 .....	100
Gambar 4.60	Respons Daya Mekanik Pada Kasus <i>short circuit</i> Bus PP-2 .....	101
Gambar 4.61	Respons Frekuensi Pada Kasus <i>short circuit</i> Bus 00BFA .....	102
Gambar 4.62	Respons Tegangan Pada Kasus <i>short circuit</i> Bus 00BFA .....	103
Gambar 4.63	Respons Sudut Rotor Pada Kasus <i>short circuit</i> Bus 00BFA .....	104
Gambar 4.64	Respons Daya Mekanik Pada Kasus <i>short circuit</i> Bus 00BFA .....	105
Gambar 4.65	Respons Frekuensi Pada Kasus M-BFP1A (930 kW) <i>start</i> .....	106
Gambar 4.66	Respons Tegangan Pada Kasus M-BFP1A (930 kW) <i>start</i> .....	107
Gambar 4.64	Respons Sudut Rotor Pada Kasus M-BFP1A (930 kW) <i>start</i> .....	108

# **BAB I**

## **PENDAHULUAN**

### **1.1 Latar Belakang Masalah**

Kestabilan transien adalah kemampuan suatu sistem kelistrikan untuk menjaga keselarasan operasi saat terjadi gangguan yang besar pada sistem. Kestabilan transien adalah suatu masalah nonlinier sehingga untuk menganalisisnya dengan akurat dibutuhkan metode yang dinamakan *Time Domain Simulation*. Kestabilan transien berhubungan dengan gangguan besar yang terjadi secara tiba-tiba dalam waktu singkat seperti gangguan hubung singkat, pemutusan circuit breaker(CB), serta penambahan atau pengurangan beban secara tiba-tiba. Untuk mengetahui kestabilan sistem secara keseluruhan ada hal yang harus diketahui yaitu batas kestabilan. Batas kestabilan adalah batas maksimal sistem tersebut untuk menyalurkan daya maksimal pada suatu bagian sistem dari sistem atau peralatan.

Sebuah sistem dikatakan stabil apabila jumlah daya elektrik yang keluar sama dengan daya mekanik yang dihasilkan. Ketidaksesuaian pada daya elektrik mampu memberikan dampak pada perubahan frekuensi sistem dan juga perubahan tegangan. Hal ini sangat erat kaitannya dengan kestabilan transien, karena hal-hal seperti ini terjadi pada waktu yang singkat sehingga mengganggu kestabilan transien. Untuk mengatasi ketidak seimbangan pada daya elektrik dan daya mekanik maka kita dapat memanipulasi kedua daya tersebut dengan menggunakan pelepasan beban untuk memanipulasi daya elektrik dan pelepasan generator untuk daya mekanik.

PT. Aneka Tambang (PT. ANTAM) merupakan badan usaha milik negara (BUMN) yang bergerak dalam bidang eksplorasi, pertambangan, pengolahan serta pemasaran dari sumber daya mineral. Sistem kelistrikan PT. Antam sebelumnya memiliki pembangkitan 10x5805 kW dan 8x17076 kW. Dan saat ini telah ditambahkan generator sebesar 2x31875 kW. Namun pada konfigurasi sistem yang baru terjadi penggantian generator sebesar 10x5805 kW yang merupakan pembangkit tenaga diesel untuk diganti dengan pembangkit tenaga uap

sebesar 2x31875 kW. Estimasi beban pada PT.Antam adalah sekitar 160 MW. Sehingga sistem yang baru memiliki kapasitas sebesar 7x17076 kW dan 2x31876 kW. Semua generator ini terhubung pada bus 30kV yang berguna sebagai *synchronizing* bus yang sebelumnya menggunakan bus 11 kV sebagai *synchronizing* bus. Digunakan bus dengan tegangan lebih tinggi sehingga dapat memudahkan untuk ekspansi pabrik. Dengan adanya penggantian generator ini maka akan merubah sistem kestabilan yang telah ada pada pabrik ini sehingga perlu dianalisis ulang tentang kestabilan transien pada kondisi eksisting. Apabila tidak maka hal ini akan berdampak pada kehandalan dari sistem. Pada tugas akhir ini analisis akan difokuskan pada mekanisme *load shedding* apabila terjadi gangguan-gangguan seperti hubung singkat, generator *outage* dan motor *starting* sehingga sistem dapat kembali stabil setelah terjadi gangguan tersebut.

## **1.2 Permasalahan**

Permasalahan dalam tugas akhir ini adalah

1. Perubahan konfigurasi sistem kelistrikan pada PT. Aneka Tambang akibat penggantian generator dan penambahan beban sehingga perlu dianalisis ulang.
2. Menganalisis kestabilan frekuensi, tegangan dan sudut rotor pada PT.ANTAM pada berbagai jenis gangguan apakah telah sesuai dengan standar yang diperbolehkan.
3. Menentukan mekanisme load shedding atau generator shedding bila perlu untuk mendapatkan response frekuensi, tegangan dan sudut rotor yang sesuai standar.

### 1.3 Tujuan

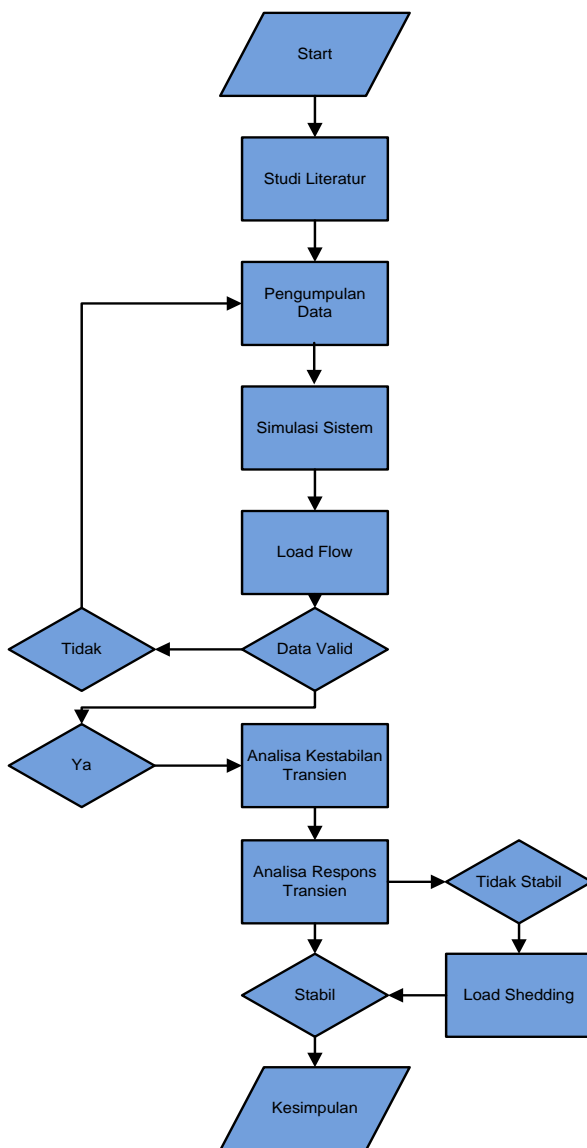
Penelitian tugas akhir ini bertujuan untuk

1. Melaksanakan studi terhadap kestabilan transien di PT. ANTAM untuk mendapatkan konfigurasi *load shedding* yang optimal sebagai hasil di tugas akhir ini. Sehingga membuat sistem lebih handal.
2. Memungkinkan sistem tetap stabil meskipun setelah terjadi berbagai macam gangguan seperti motor *starting*, hubung singkat dan juga generator *outage*.

### 1.4 Metodologi

Metodologi yang akan digunakan pada tugas akhir ini adalah

1. Studi Literatur  
Mengumpulkan materi dan pelajaran tentang dasar-dasar kestabilan transien dari berbagai referensi.
2. Pengumpulan Data  
Mengumpulkan data-data mengenai sistem kelistrikan yang digunakan pada pabrik PT. ANTAM Pomalaa, seperti *single line diagram* dan juga spesifikasi peralatan-peralatan kelistrikan pada pabrik.
3. Pemodelan dan Simulasi  
Memodelkan sistem kelistrikan pada PT. ANTAM Pomalaa ke bentuk simulasi yang dikerjakan menggunakan software ETAP 11.00. Kemudian melakukan *load flow* untuk mengetahui apabila terjadi kesalahan dalam input data.
4. Analisa Hasil Simulasi  
Hasil tersebut berupa respons transien dapat digunakan sebagai referensi untuk pengambilan keputusan, apabila tidak sesuai dengan standar maka dapat dilakukan mekanisme *load shedding* ataupun *generator shedding* bila perlu sehingga didapatkan respons yang sesuai dengan standar.
5. Kesimpulan  
Berisikan tentang kesimpulan mengenai hasil analisa simulasi dan juga berbagai penarikan keputusan yang telah dilakukan untuk membuat sistem kelistrikan menjadi lebih optimal.



**Gambar 1.1** Diagram Alir Metodologi Pelaksanaan Studi

## **1.5 Sistematika**

Sistematika penulisan tugas akhir ini adalah sebagai berikut

### **BAB I : Pendahuluan**

Bab ini membahas tentang penjelasan mengenai latar belakang , permasalahan, tujuan, metode penelitian dan sistematika penulisan tugas akhir

### **BAB II : Dasar Teori**

Bab ini berisikan tentang berbagai teori-teori dasar yang membahas tentang kestabilan transien, standar IEEE dan juga metode pelepasan beban.

### **BAB III : Sistem Kelistrikan Pada PT. Aneka Tambang Pomalaa**

Bab ini membahas tentang sistem kelistrikan yang ada pada PT. Antam selaku objek tugas akhir baik sebelum atau sesudah perubahan sistem eksisting.

### **BAB IV : Simulasi dan Analisis**

Bab ini menguraikan tentang hasil-hasil yang telah didapatkan dari simulasi data kelistrikan pada PT. Aneka Tambang Pomalaa. Bab ini terdiri dari beberapa sub-bab sesuai dengan permasalahan yaitu *Generator Outage*, *Motor Starting* dan *Short Circuit*. Bab ini juga berisikan tentang solusi berupa *load shedding*.

### **BAB V : Kesimpulan**

Bab ini berisi tentang kesimpulan tugas akhir dan solusi atau saran dari analisa yang telah dilakukan.

## **1.6 Relevansi**

Hasil yang diperoleh dari penelitian dalam tugas akhir ini diharapkan dapat memberi manfaat

1. Digunakan sebagai acuan dalam melakukan mekanisme *load shedding* pada sistem kelistrikan PT.Aneka Tambang Pomalaa.
2. Dapat dijadikan referensi pada penelitian tugas akhir selanjutnya tentang stabilitas transien pada sistem kelistrikan industri.



*Halaman Ini Sengaja Dikosongkan*

## **BAB II**

### **DASAR TEORI**

#### **2.1 Pengertian Kestabilan Sistem Tenaga Listrik**

Kestabilan sistem tenaga listrik dapat didefinisikan sebagai kemampuan suatu sistem tenaga listrik untuk memperoleh kembali kesetimbangan sistem setelah terjadi gangguan. Kestabilan sistem tenaga listrik dapat dipengaruhi oleh gangguan yang terjadi dalam sistem, baik gangguan kecil maupun gangguan yang besar. Dalam kestabilan sistem tenaga listrik terdapat dua jenis daya yang menjadi patokan utama untuk menunjukkan sistem tersebut stabil ataupun tidak, yakni daya elektrik dan daya mekanik [8]. Daya Elektrik adalah daya yang diserap oleh sistem dengan kata lain daya elektrik adalah daya output untuk menanggung beban dalam sistem kelistrikan. Sedangkan daya mekanik adalah daya input atau daya yang dihasilkan oleh pembangkitan generator. Kedua daya ini sangat terkait satu sama lain karena kedua daya ini haruslah seimbang untuk memperoleh sistem yang stabil. Daya mekanik yang lebih besar daripada daya elektrik mampu mengakibatkan meningkatnya putaran rotor dikarenakan daya yang diperlukan lebih kecil daripada yang diterima. Sebaliknya apabila daya elektrik lebih besar daripada daya mekanik maka perputaran rotor akan melambat karena daya beban yang ditanggung lebih besar daripada daya yang dihasilkan. Kedua hal ini mampu membuat sistem kehilangan sinkronisasi.

Dalam suatu sistem yang riil tidak mungkin terbebas dari gangguan, hal ini menyebabkan berubahnya kestabilan dalam sistem. Periode dimana suatu sistem kelistrikan mengembalikan sistem ke dalam keadaan yang stabil setelah terjadi gangguan disebut periode transient. Saat stabil maka sistem mampu bertahan terhadap osilasi yang terjadi sesaat setelah terjadi gangguan dan mencapai keadaan steady state. Sistem tersebut dikatakan tidak stabil apabila sistem tersebut tidak kembali ke keadaan steady state saat osilasi yang disebabkan oleh gangguan terjadi. Saat tidak stabil maka ada kemungkinan sistem akan

terus berosilasi atau sistem akan melebihi batas equilibrium. Terdapat tiga jenis kestabilan pada sistem tenaga listrik yaitu :

#### **2.1.1. Kestabilan Steady State**

Kestabilan steady state merupakan kemampuan suatu sistem untuk menjaga operasi sinkron antar mesin apabila terjadi gangguan kecil. Steady state stability adalah kemampuan sistem kelistrikan untuk membawa sistem kembali kedalam keadaan stabil setelah terjadi gangguan kecil pada jaringan seperti kenaikan atau penurunan beban secara tiba-tiba dan juga adanya perubahan pada AVR. Dan apabila aliran daya pada sistem tersebut melebihi jumlah daya yang diizinkan maka ada kemungkinan gangguan tersebut menyebabkan beberapa peralatan atau mesin akan lepas sinkron dengan sistem. Sehingga menyebabkan gangguan lebih lanjut. Sehingga steady state stability juga dapat didefinisikan sebagai batas kemampuan suatu sistem untuk menampung daya dalam sistem kelistrikan tanpa harus kehilangan steady state stability yang ia miliki.

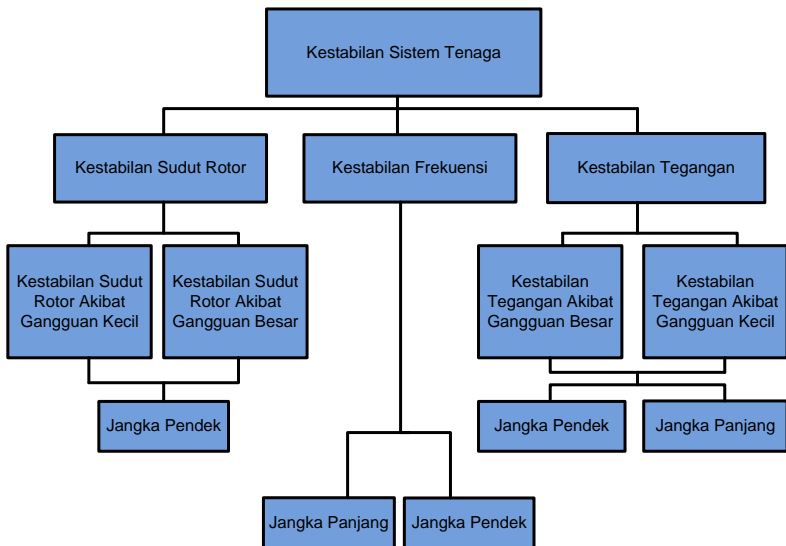
#### **2.1.2. Kestabilan Transien**

Kestabilan Transien merupakan kemampuan suatu sistem untuk tetap mempertahankan sinkronisasi antar mesin setelah terjadi gangguan besar, dan juga kemampuan suatu sistem untuk mengembalikan kedalam keadaan steady state setelah terjadi gangguan besar. Contohnya adalah pelepasan atau pemasangan beban secara tiba-tiba, operasi pemutusan atau penutupan circuit breaker, dan kegagalan saluran. Sehingga dapat dikatakan bahwa kestabilan transien adalah kemampuan suatu sistem untuk mendapatkan kembali operasi sinkron pada sistem setelah terjadi gangguan dalam jangka waktu yang cukup lama. Kestabilan transien bergantung pada konfigurasi sistem sebelum gangguan dan juga seberapa parah gangguan yang terjadi. Waktu studi untuk kestabilan transien biasanya adalah sekitar 3-5 detik setelah terjadinya gangguan dan 10-20 detik untuk sistem yang sangat besar [1].

### 2.1.3. Kestabilan Dinamis

Kestabilan dinamis merupakan kemampuan dari suatu sistem tenaga listrik untuk mempertahankan sinkronisasi antar mesin akibat gangguan besar, namun apabila sesaat setelah gangguan sistem masih belum mencapai keadaan steady state maka sistem akan mencapai keadaan setimbang yang baru.

Kestabilan Sistem Tenaga Secara Keseluruhan dapat dilihat pada gambar berikut :



**Gambar 2.1** Klasifikasi Kestabilan Pada Sistem Tenaga Listrik Berdasarkan IEEE

## 2.2 Klasifikasi Kestabilan Pada Sistem Tenaga Listrik

Berdasarkan *IEEE Transactions On Power Systems* dengan judul "*Definition and Classification of Power System Stability*" tahun 2004, kestabilan sistem tenaga meliputi ketiga hal berikut ini :

### **2.2.1 Kestabilan Sudut Rotor**

Kestabilan sudut rotor merupakan kemampuan dari mesin sinkron yang terhubung dengan sistem untuk tetap sinkron setelah terjadi gangguan. Sehingga tergantung dari kemampuan untuk mempertahankan torsi mekanik dan torsi elektrik tetap seimbang. Ketidakstabilan akan mengakibatkan naiknya sudut rotor yang berbeda-beda dari generator sehingga dapat mengakibatkan generator mengalami hilang sinkronisasi dengan generator lain. Faktor dasar dari permasalahan ini yaitu daya output akan berubah seiring berubahnya sudut rotor [2].

Beberapa hal mempengaruhi kestabilan sudut rotor antara lain gangguan kecil dan gangguan transient. gangguan kecil merupakan gangguan yang disebabkan oleh perubahan beban kecil. Gangguan kecil mempunyai kurun waktu 10-20 detik setelah terjadi gangguan. Ketidakstabilan gangguan kecil dipengaruhi oleh kurangnya torsi sinkronisasi dan kurangnya torsi damping. Sedangkan untuk gangguan transient merupakan gangguan yang disebabkan perubahan beban atau pembangkit yang cukup besar secara tiba – tiba biasanya berupa hubung singkat dan pelepasan beban yang mendadak. Gangguan besar mempunyai kurun waktu 3-5 detik setelah terjadi gangguan namun jika sistem yang sangat besar dengan ayunan antar wilayah yang dominan maka kurun waktu diperpanjang menjadi 10-20 detik. Sehingga kestabilan sudut rotor gangguan kecil dan transient dikategorikan sebagai fenomena jangka pendek [3].

### **2.2.2 Kestabilan Frekuensi**

Kestabilan Frekuensi merupakan kemampuan pada sistem tenaga untuk mempertahankan frekuensi yang stabil ketika terjadi gangguan besar akibat ketidakseimbangan antara pembangkitan dan beban yang signifikan [1]. Kestabilan frekuensi terbagi menjadi dua yaitu jangka pendek dan jangka panjang. Ketidakstabilan frekuensi jangka pendek contohnya adalah kurangnya daya pembangkit –an atau kurangnya beban yang dilepas pada saat sistem overload sehingga menyebabkan terjadinya blackout. Sedangkan untuk kestabilan frekuensi jangka panjang contohnya adalah terjadinya percepatan yang berlebih atau

overspeed pada turbin uap dikarenakan *governor* yang tidak bekerja dengan baik.

### **2.2.3 Kestabilan Tegangan**

Kestabilan tegangan merupakan kemampuan sistem tenaga listrik untuk mempertahankan tegangan yang stabil pada semua bus dari sistem tenaga setelah mengalami gangguan. Dari jenis gangguan, kestabilan tegangan dibagi menjadi dua yaitu gangguan kecil dan gangguan besar. Kestabilan tegangan dengan gangguan kecil contohnya adalah karena perubahan beban. Sedangkan kestabilan tegangan dengan gangguan besar contohnya seperti terjadinya gangguan lepasnya generator atau gangguan hubung singkat

Dari lama waktu gangguan, kestabilan tegangan dapat dibagi menjadi jangka pendek dan jangka panjang. Kestabilan tegangan jangka pendek yaitu berupa kedip tegangan atau kenaikan tegangan dalam waktu yang singkat, jangka pendek memiliki kisaran waktu antara 0.01 hingga maksimal 60 detik. Sedangkan kestabilan tegangan jangka panjang yaitu undervoltage dan overvoltage dalam rentang waktu lebih dari 1 menit. Perubahan tegangan untuk operasi normal adalah sebesar 95-105%. Sehingga apabila lebih atau kurang dari rentang tersebut dapat dikatakan terjadi overvoltage atau undervoltage.

Gangguan dalam kestabilan sistem tenaga listrik dibagi menjadi dua macam yaitu [9]

#### **a) Gangguan Kecil**

Gangguan kecil atau small disturbance, hal ini terjadi karena perubahan beban kecil yang terjadi pada sistem kelistrikan

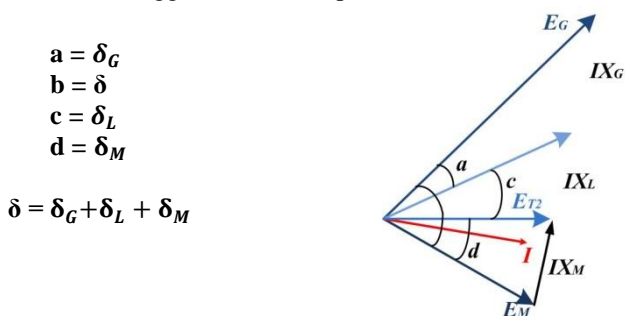
#### **b) Gangguan Besar**

Gangguan besar atau Large disturbance terjadi karena perubahan beban besar yang terjadi secara tiba-tiba seperti gangguan hubung singkat.

## **2.3 Hubungan Daya dengan Sudut Rotor**

Dalam kestabilan sistem kelistrikan terdapat hubungan yang erat antara perubahan daya dengan posisi rotor pada mesin sinkron. Hal ini digambarkan apabila generator mensuplai beban berupa motor, daya

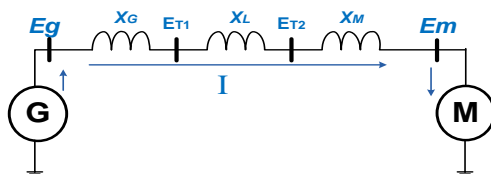
yang dikirimkan pada motor tersebut adalah hasil dari perbedaan sudut kedua mesin tersebut. Perbedaan sudut ini disebabkan oleh tiga komponen, yaitu sudut internal generator  $\delta_G$  (sudut rotor generator mendahului medan putar stator), perbedaan sudut antara tegangan terminal generator dan motor  $\delta_L$  (medan putar stator generator mendahului medan putar motor), dan sudut internal motor  $\delta_M$  (sudut dimana rotor tertinggal oleh medan putar stator) [2].



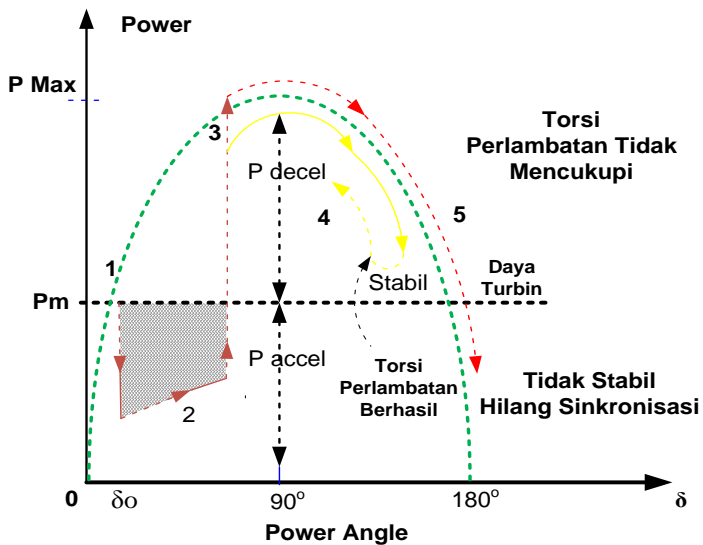
Gambar menunjukkan diagram fasor antara tegangan generator dan motor. Daya yang ditransfer dari generator menuju motor diberikan pada persamaan :

$$P = \frac{E_G E_M}{X_T} \sin \delta \quad (2.1)$$

Dimana  $X_T$  adalah penjumlahan dari  $X_G$ ,  $X_L$ , dan  $X_M$   
 Untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada gambar 2.2 berikut ini



**Gambar 2.2** Diagram Reaktansi Sistem Dua Mesin



**Gambar 2.3** Kurva Daya dan Sudut Daya Saat Terjadi Gangguan [4]

Dari gambar diatas dapat dijelaskan perilaku generator ketika terjadi gangguan. Berikut ini adalah penjelasan tiap kejadiannya:

1. Keadaan saat generator belum terjadi gangguan mulai dari lintasan antara nomor 0 hingga 1.
2. Keadaan ketika generator mengalami gangguan dan menuju ke lintasan pada nomor 1 hingga 2. Hal ini mengakibatkan penurunan output generator dan juga daya mekanis turbin secara signifikan. Hal ini membuat perbedaan antara daya output generator dengan daya mekanis turbin. Sehingga rotor pada generator mengalami percepatan dan sudut rotor bertambah besar.
3. Keadaan saat gangguan telah dihilangkan oleh pengaman ditunjukkan pada lintasan nomor 2 hingga 3. Hal ini



menyebabkan daya output generator dan daya mekanis turbin kembali meningkat pada peristiwa ini juga terjadi perlambatan pada putaran rotor dan apabila daya output generator lebih besar dari pada daya mekanis turbin maka akan dihasilkan torsi perlambatan, jika torsi perlambatan tidak mencukupi atau mampu mengimbangi kecepatan putar generator maka grafik akan melintasi garis kuning menuju peristiwa nomor 4. Namun apabila torsi perlambatan tidak mencukupi maka grafik akan melintasi garis merah menuju peristiwa nomor 5.

4. Keadaan dimana torsi perlambatan yang dihasilkan mencukupi atau mampu mengimbangi antara daya mekanis turbin dengan daya listrik generator, maka sistem akan stabil dalam ayunan pertama
5. Keadaan dimana torsi perlambatan yang dihasilkan terlalu besar atau tidak mampu mengimbangi antara daya mekanis turbin dengan daya listrik generator sehingga sudut rotor akan bertambah besar yang akan membuat sistem kehilangan sinkronisasi

### 2.3.1 Dinamika Rotor dan Persamaan Ayunan [4]

Pengaturan pergerakan rotor mesin sinkron memiliki prinsip dasar dinamika Persamaan yang merepresentasikan gerakan rotor mesin sinkron didasarkan pada prinsip dasar dinamika yang menyatakan bahwa momen putar percepatan (*accelerating torque*) adalah hasil kali dari momen-momen kelembaman (*moment of inertia*) rotor dan percepatan sudutnya. Dalam sistem unit MKS persamaan generator sinkron dapat ditulis :

$$J \frac{d^2 \theta_m}{dt^2} = T_a = T_m - T_e \quad (2.2)$$

Dimana,

- J : Momen kelembaman total dari massa rotor dalam  $kg \cdot m^2$
- $\theta_m$  : Pergeseran sudut dari rotor terhadap suatu sumbu yang diam dalam radian mekanis (rad)
- t : Waktu dalam detik (s)

- $T_m$  : Momen putar mekanis atau poros penggerak yang diberikan oleh *prime mover* dikurangi dengan momen putar perlambatan (*retarding*) yang disebabkan oleh rugi-rugi perputaran, dalam N-m  
 $T_e$  : Momen putar listrik atau elektromagnetik, dalam N-m  
 $T_a$  : Momen putar kecepatan percepatan bersih (*net*), dalam N-m

Nilai torsi mekanis  $T_m$  dan torsi listrik  $T_e$  pada generator sinkron dianggap positif. Hal ini berarti bahwa  $T_m$  merupakan torsi resultan yang rotornya condong mengalami percepatan ke arah  $\theta_m$  positif. Pada saat beroperasi steady-state nilai dari  $T_m$  dan  $T_e$  adalah sama dan torsi percepatan  $T_e$  adalah nol. Pada kasus ini tidak terjadi peristiwa percepatan atau perlambatan dari rotor, sehingga dapat dikatakan rotor dan prime mover dalam keadaan sinkron satu sama lain. Persamaan tersebut berlaku untuk prime mover turbin air atau turbin uap.

Karena  $\theta_m$  diukur terhadap sumbu referensi stasioner pada stator. Sehingga menyebabkan nilai  $\theta_m$  meningkat secara konstan terhadap waktu bahkan pada kecepatan sinkron yang konstan. Karena kecepatan rotor *relative* terhadap kecepatan sinkron, sehingga akan lebih mudah untuk mengukur posisi sudut rotor terhadap sumbu referensi yang berputar pada kecepatan sinkron. Oleh karena itu dapat didefinisikan sebagai berikut :

$$\theta_m = \omega_{sm}t + \delta_m \quad (2.3)$$

Dimana,

$\omega_{sm}$  : Kecepatan sinkron mesin, dalam *radians* per detik

$\delta_m$  : Sudut pergeseran rotor, dalam *mechanical radians*, dari sumbu referensi putaran sinkron

$\theta_m$  : Pergeseran sudut dari rotor terhadap suatu sumbu yang diam dalam radian mekanis (rad)

Berikut ini adalah penurunan dari persamaan (2.3) :

$$\frac{d\theta_m}{dt} = \omega_{sm} + \frac{d\delta_m}{dt} \quad (2.4)$$

$$\frac{d^2\theta_m}{dt^2} = \frac{d^2\delta_m}{dt^2} \quad (2.5)$$

Persamaan 2.5 menunjukkan bahwa kecepatan sudut rotor  $d\theta_m/dt$  adalah konstan dan kecepatan sinkron pada saat  $d\theta_m/dt$  adalah nol. Sehingga  $d\theta_m/dt$  menunjukkan deviasi kecepatan rotor saat sinkron dengan satuan pengukuran mechanical radians per second. Sedangkan pada persamaan (2.5) menunjukkan percepatan rotor diukur dengan satuan mekanikal radian per second kuadrat.

Kemudian dengan mensubstitusikan persamaan (2.5) pada (2.2), maka didapatkan persamaan baru sebagai berikut :

$$J \frac{d^2\delta_m}{dt^2} = T_a = T_m - T_e \quad \text{N-m} \quad (2.6)$$

Persamaan tersebut dapat disederhanakan menjadi :

$$\omega_m = \frac{d\theta_m}{dt} \quad (2.7)$$

Persamaan (2.7) menunjukkan nilai kecepatan sudut dari rotor. Menurut prinsip dasar dinamika rotor yang menyatakan bahwa daya (P) adalah perkalian antara Torsi dengan kecepatan sudut, sehingga dari persamaan (2.6) dikalikan dengan  $\omega_m$  persamaan (2.7), maka didapatkan persamaan sebagai berikut :

$$J\omega_m \frac{d^2\delta_m}{dt^2} = P_a = P_m - P_e \quad \text{W} \quad (2.8)$$

Dimana,

$P_m$  : Daya input mekanis dengan rugi-rugi perputaran yang lebih kecil

$P_e$  : Daya output elektrik yang melewati air gap

$P_a$  : Daya percepatan yang menyatakan ketidakseimbangan keduanya

Biasanya nilai dari rugi-rugi perputaran dan rugi-rugi jangkar ( $I^2 R$ ) dapat diabaikan.  $P_m$  digambarkan sebagai daya mekanis prime mover dan  $P_e$  sebagai daya output listrik.

Koefisien  $J\omega_m$  adalah sudut rotor momentum pada kecepatan sinkron  $\omega_m$ , hal ini dinotasikan dengan  $M$  (konstanta inersia mesin). Satuan  $M$  yaitu *joule-seconds per mechanical radian*, dan dapat ditulis:

$$M \frac{d^2 \delta_m}{dt^2} = P_a = P_m - P_e \quad \text{W} \quad (2.9)$$

Dalam studi kestabilan transien terdapat suatu konstanta yang sering dijumpai yaitu inersia mesin ( $H$ ).  $H$  (inertia) menunjukkan suatu kemampuan dari sebuah mesin sinkron dalam menahan gangguan.  $H$  (inertia) dapat didefinisikan sebagai berikut :

$$H = \frac{\text{Daya kinetis yang disimpan dalam mega joule pada kecepatan sinkron}}{\text{rating mesin dalam MVA}} \quad (2.10)$$

dan

$$H = \frac{\frac{1}{2} J \omega_{sm}^2}{S_{mach}} = \frac{\frac{1}{2} M \omega_{sm}}{S_{mach}} = \text{MJ/MVA} \quad (2.11)$$

Dimana  $S_{mach}$  adalah rating 3 fasa dari mesin dalam MVA. Dengan menyelesaikan persamaan untuk mendapatkan nilai  $M$  pada persamaan (2.11), kita mendapatkan persamaan :

$$M = \frac{2H}{\omega_{sm}} S_{mach} \quad \text{MJ/mech rad} \quad (2.12)$$

Dengan mensubstitusikan  $M$  di persamaan (2.12) dengan  $M$  pada persamaan (2.9) didapatkan :

$$\frac{2H}{\omega_{sm}} \frac{d^2 \delta_m}{dt^2} = \frac{P_a}{S_{mach}} = \frac{P_m - P_e}{S_{mach}} \quad (2.13)$$

Perlu diketahui bahwa  $\delta_m$  memiliki satuan *mechanical radians* dan  $\omega_{sm}$  memiliki satuan *mechanical radians per second*. Sehingga kita dapat menuliskannya sebagai persamaan berikut ini:

$$\frac{2H}{\omega_s} \frac{d^2\delta}{dt^2} = P_a = P_m - P_e \text{ (per unit)} \quad (2.14)$$

Dengan asumsi bahwa  $\delta$  dan  $\omega_s$  memiliki nilai yang konsisten, yang berarti dapat berupa derajat dan radian mekanis ataupun elektrik.  $H$  dan  $t$  memiliki nilai yang konsisten dengan satuan MJ/MVA dan *second*.  $P_a P_m P_e$  harus dalam satuan per unit. Dan Dengan  $\omega_s = 2\pi f$ , maka didapatkan persamaan sebagai berikut ini :

$$\frac{H}{\pi f} \frac{d^2\delta}{dt^2} = P_a = P_m - P_e \quad (2.15)$$

Saat  $\delta$  dalam *electrical radians* :

$$\frac{H}{180f} \frac{d^2\delta}{dt^2} = P_a = P_m - P_e \quad (2.16)$$

Saat  $\delta$  dalam *electrical degrees*. Pada persamaan (2.16), disebut *swing equation* dari sebuah mesin yang biasa kita sebut dengan persamaan ayunan, persamaan ini adalah suatu persamaan yang mengatur dinamika rotasi dari mesin sinkron dalam studi kestabilan. Persamaan tersebut dapat dituliskan kembali menjadi dua orde pertama persamaan diferensial sebagai berikut :

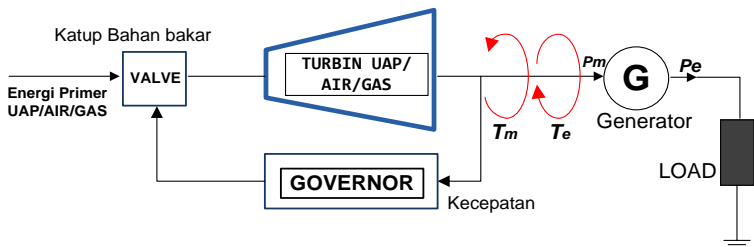
$$\frac{2H}{\omega_s} \frac{d\omega}{dt} = P_m - P_e \text{ (per unit)} \quad (2.17)$$

$$\frac{d^2\delta}{dt^2} = \omega - \omega_s \quad (2.18)$$

Kita menggunakan berbagai jenis persamaan pada persamaan ayunan untuk mengetahui kestabilan dari mesin dalam sistem kelistrikan. Ketika didapatkan persamaan ayunan, kita juga mendapatkan nilai dari  $\delta$  sebagai fungsi waktu. Dan grafik dari nilai tersebut disebut sebagai *swing curve* (diagram ayunan) dari mesin. Dengan menganalisa diagram ayunan kita mampu mengetahui seberapa besar kemampuan dari mesin untuk bertahan dan mempertahankan operasi yang sinkron saat terjadi gangguan.

## 2.4 Pengaturan Frekuensi

Pada Generator terdapat suatu perangkat yang berguna sebagai pengatur nilai frekuensi, governor mengatur kecepatan putar turbin pada generator dengan cara membuka menutup katup bahan bakar pada input generator sehingga saat terjadi percepatan dan perlambatan pada generator. Seperti yang kita ketahui bahwa percepatan dan perlambatan pada generator sangat berkaitan erat dengan nilai torsi mekanik dan torsi elektrik pada generator itu sendiri. Untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada gambar berikut ini.



**Gambar 2.4** Blok Diagram Konsep Dasar Speed Governing

Keterangan Gambar 2.4 adalah sebagai berikut ini

$$T_a = T_m - T_e$$

Dimana :

$T_m$  = Torsi Mekanik

$T_e$  = Torsi Elektrik

$P_e$  = Daya Elektrik

$P_m$  = Daya Mekanik

Ketika terjadi perubahan pada beban, maka akan mengakibatkan terjadinya perubahan torsi elektrik ( $T_e$ ) pada generator. Hal ini membuat perbedaan antara torsi mekanik ( $T_m$ ) dan torsi elektrik ( $T_e$ ) yang menyebabkan perubahan pada kecepatan sudut rotor [10]. Frekuensi pada sistem tenaga listrik mempunyai hubungan erat dengan daya aktif. Suplai daya aktif pada sistem harus sesuai dengan kebutuhan daya aktif agar frekuensi sistem tetap dalam batas yang diizinkan. Penyesuaian daya aktif ini dilakukan dengan mengatur kopel mekanis untuk memutar generator, dengan kata lain pengaturan pemberian bahan bakar turbin.

Pengaturan pemberian bahan bakar ini dilakukan oleh governor. Governor akan menambah kapasitas bahan bakar ketika frekuensi turun dari nominalnya dan mengurangi kapasitas ketika frekuensi naik dari nominalnya [3].

## **2.5 Kejadian yang mempengaruhi Kestabilan**

Jenis-jenis gangguan yang mempengaruhi kestabilan dalam sistem tenaga listrik adalah

### **2.5.1. Motor Starting**

Pada saat starting motor, arus yang mengalir pada sistem tersedot oleh motor sehingga jumlah arus yang mengalir pada bus dimana motor dipasang sangat besar karena kebutuhan motor. Hal ini menyebabkan turunnya frekuensi dan tegangan saat peristiwa ini terjadi. Namun apabila kapasitas pembangkitan sistem yang tersedia jauh lebih besar dari beban yang ditampung maka tidak akan terjadi penurunan tegangan dan frekuensi. Hal ini berlaku juga pada motor starting yang berkapasitas rendah.

### **2.5.2. Generator Lepas**

Pada kejadian lepasnya generator juga mempengaruhi kestabilan sistem karena saat pembangkit tersebut memiliki daya pembangkitan yang tidak jauh beda dengan beban yang harus dipikul oleh sistem kejadian lepasnya generator pada sistem akan menyebabkan terjadinya overload. Saat nilai beban lebih besar dari pada nilai pembangkitan maka akan menyebabkan ketidak stabilan pada sudut rotor.

### **2.5.3. Perubahan Beban**

Perubahan beban juga memiliki dampak yang signifikan terhadap kestabilan sistem tenaga, karena saat terjadi perubahan beban yang besar secara seketika maka frekuensi pada sistem akan berubah. Apabila terjadi penambahan beban secara seketika dan ternyata melebihi daya pembangkitan maka akan terjadi penurunan frekuensi atau bahkan terjadi blackout. Sedangkan apabila terjadi pengurangan beban dilakukan secara tiba-tiba maka akan terjadi

*overspeed* pada generator atau meningkatnya frekuensi pada generator. Semua perubahan pada frekuensi ini berbanding lurus dengan perubahan tegangan pada sistem.

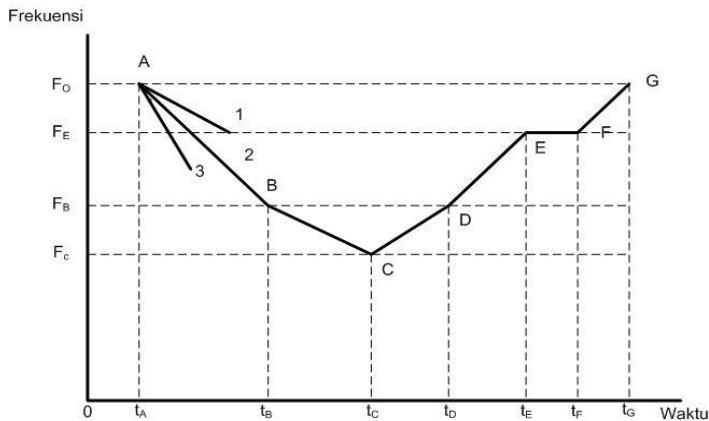
#### **2.5.4. Gangguan Hubung Singkat**

Hal lain yang umumnya menjadi masalah pada suatu sistem kelistrikan yang mampu menyebabkan terganggunya kestabilan adalah gangguan hubung singkat. Semua jenis gangguan hubung singkat akan menyebabkan ketidakstabilan pada sistem. Tapi untuk studi transien biasanya digunakan gangguan hubung singkat yang memiliki arus hubung singkat yang paling besar yaitu hubung singkat 3 fasa ke tanah. Saat terjadi gangguan hubung singkat seperti halnya saat motor starting arus yang mengalir ke titik hubung singkat akan meningkat secara drastis bahkan sangat besar sehingga mampu merusak peralatan yang dilalui oleh arus tersebut. Peningkatan arus yang signifikan pada titik hubung singkat akan menyebabkan terjadinya drop tegangan secara signifikan.

### **2.6 Sistem Pelepasan Beban (Load Shedding)**

Dalam mempertahankan kestabilan sistem kelistrikan apabila terjadi gangguan diperlukan adanya pelepasan beban. Pada saat suatu sistem mengalami gangguan maka daya listrik dan daya mekanis menjadi tidak seimbang [11], misalnya saat terjadi *Generator Outage* maka jumlah daya yang disuplai oleh sistem menjadi berkurang dan beban yang dipikul oleh sistem tersebut tetap sama sehingga dibutuhkan suatu pengurangan beban pada sistem sehingga tidak terjadi *blackout* pada sistem kelistrikan.





**Gambar 2.5** Perubahan frekuensi sebagai fungsi waktu dengan adanya pelepasan beban[5]

Sebelumnya telah dijelaskan bahwa pelepasan beban merupakan salah satu hal yang harus dilakukan apabila terjadi gangguan seperti *generator outage* yang mampu mengakibatkan kurangnya daya pembangkitan pada sistem sehingga terjadi overload dan mampu memicu terjadinya *blackout*. Untuk menjaga sistem agar tetap stabil setelah gangguan diperlukan *loadshedding* dengan standar tertentu agar dicapai kestabilan. Dengan melakukan pelepasan beban kita mampu memperbaiki tegangan dan frekuensi pada sistem yang menurun akibat gangguan. Gambar 2.5 diatas menjelaskan grafik pelepasan beban terhadap fungsi waktu. Pada saat  $t = t_a$  menunjukkan titik awal sistem mulai terjadi penurunan frekuensi akibat hilangnya pembangkitan atau kekurangan daya sehingga terjadi penurunan frekuensi ke titik 1 atau 2 atau 3, ketiga titik ini menunjukkan jumlah daya yang hilang apabila semakin banyak daya yang hilang maka kecuraman penurunan frekuensi akan semakin tinggi sehingga titik nomor 3 merupakan titik yang memiliki penurunan daya terbesar. Pada  $t = t_b$  atau pada titik B frekuensi telah menurun menjadi  $f = F_b$  dilakukan pelepasan beban tahap 1 yang ditunjukkan pada pada titik  $t = t_c$  sehingga mampu memperlambat penurunan frekuensi pada titik  $f = F_c$  namun hal ini belum menghentikan penurunan frekuensi sehingga diperlukan pelepasan

beban tahap 2 . Hasil pelepasan beban tahap kedua ditunjukkan pada titik  $t = t_d$  dimana terjadi kenaikan frekuensi ke titik  $F_d = F_b$  karena kenaikan frekuensi terlalu lambat terhadap fungsi waktu sehingga dilakukan pelepasan beban tahap ketiga sehingga frekuensi mencapai titik  $F_e$ . Dengan adanya pelepasan beban tahap 3 membuat kenaikan frekuensi untuk mencapai frekuensi normal semakin cepat, namun kecepatannya kenaikan masih belum mencukupi untuk mencapai frekuensi normal sehingga dilakukan pelepasan beban tahap 4 yang dilakukan pada  $t = t_e$  pada titik ini frekuensi sudah menjadi stabil namun karena frekuensi belum memenuhi standar operasi maka dilakukan pelepasan beban tahap 5 pada  $t = t_f$  dengan adanya pelepasan beban tahap 5 membuat frekuensi sistem kembali ke frekuensi normal  $f = F_o$ .

#### **2.6.1. Pelepasan Beban secara Manual**

Pelepasan beban secara manual menggunakan *circuit breaker*. Hal ini dilakukan secara manual oleh operator. Pelepasan beban secara manual biasanya dilakukan pada saat starting motor yang besar karena pada saat starting motor maka akan terjadi penurunan kestabilan sistem. Sehingga sebelum dilakukan motor starting perlu dilakukan pelepasan beban secara manual. Hal ini mencegah terjadinya penurunan frekuensi dan tegangan yang terlalu besar.

#### **2.6.2 Pelepasan Beban secara Otomatis [12]**

Pelepasan beban secara otomatis biasanya dapat dilakukan menggunakan dua jenis relay yang berbeda yaitu :

##### **a) Underfrequency Relay (81U)**

Pelepasan beban menggunakan rele ini dilakukan berdasarkan seberapa besar penurunan frekuensi yang terjadi dalam sistem. Rele ini direncanakan dengan perhitungan tentang penurunan frekuensi akibat hilangnya pembangkitan atau lepasnya generator karena pada gangguan seperti ini frekuensi pada sistem akan menurun secara drastis bergantung dari jumlah generator yang terlepas dan beban dari sistem

kelistrikan itu sendiri. Dengan pelepasan beban otomatis menggunakan relay underfrequency maka saat terjadi gangguan yang menyebabkan penurunan frekuensi sistem menurun hingga nilai yang ditentukan maka beban yang telah direncanakan untuk dilepas akan terlepas secara otomatis sesuai pengaturan setting *relay underfrequency*.

#### **b) Lockout Relay (86)**

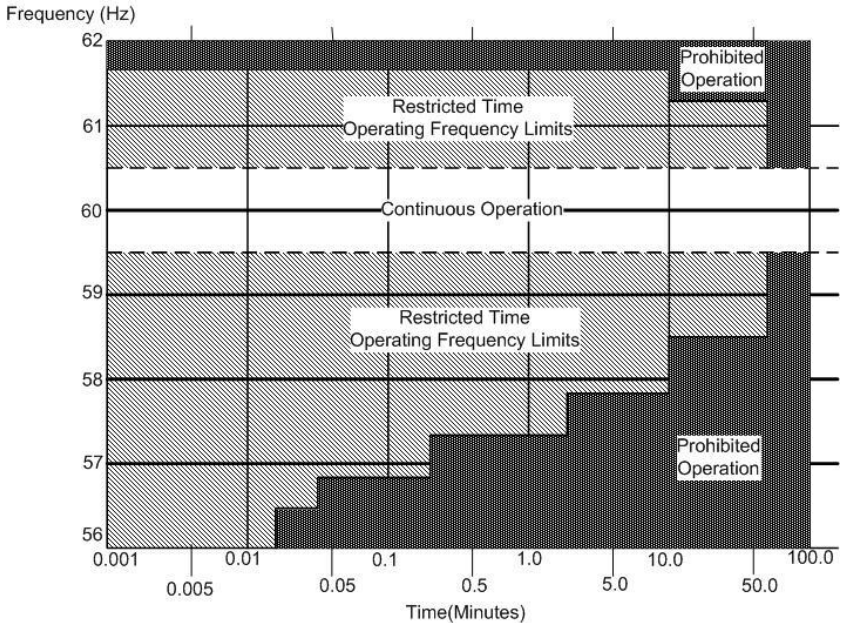
Pelepasan beban menggunakan relay ini dilakukan berdasarkan status tertentu yang telah diatur dalam setting relay ini. Pada kasus yang sama yaitu kasus lepasnya generator dengan menggunakan relay ini maka pelepasan akan dilakukan secepat mungkin tanpa menunggu frekuensi tertentu, dan hal ini dilakukan setelah terjadi gangguan dengan kondisi-kondisi tertentu. Kondisi tersebut dapat bermacam-macam sesuai dengan kasus gangguan yang terjadi. Hal ini memungkinkan sistem mencapai kestabilan jauh lebih cepat daripada *relay underfrequency*.

### **2.7 Standar Untuk Analisa Kestabilan Transien**

Dalam menentukan sistem tenaga listrik tersebut stabil atau tidak kita dapat menganalisa dari hasil simulasi dengan melihat respons tegangan dan frekuensi dan juga standar pelepasan beban untuk sistem yang tidak stabil.

### 2.7.1. Standar Frekuensi [6]

Untuk Steam Turbine Generator (IEEE Std C37.106-2003).Berdasarkan Standar frekuensi yang ditetapkan oleh IEEE untuk Steam Turbine Generator adalah sebagai berikut :



**Gambar 2.6** Standar Batas Operasi Frekuensi Untuk Turbin Uap

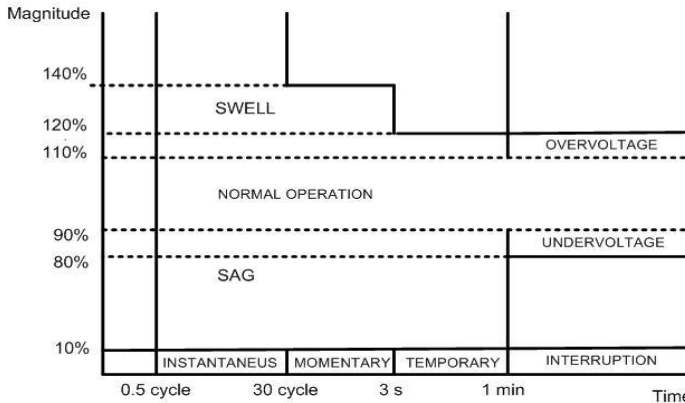
IEEE Std.106-2003 adalah standar yang digunakan untuk menentukan operasi frekuensi yang diijinkan dalam suatu sistem tenaga listrik. IEEE Std.106-2003 menggunakan frekuensi 60 Hz. Namun pada sistem di Indonesia umumnya menggunakan frekuensi 50 Hz. Sehingga perlu mengubah standar IEEE Std.106-2003 dalam bentuk persentase sehingga bisa digunakan untuk frekuensi 50 Hz. Restricted Time Operating frequency limits merupakan daerah diatas atau dibawah frekuensi normal yang masih diijinkan namun hanya bersifat sementara (tergantung besar frekuensi dalam waktu tertentu). Semakin jauh dari rentang frekuensi normal maka semakin singkat

waktu yang diijinkan pada kondisi tersebut. *Prohibited operation* merupakan daerah dimana frekuensi sudah melebihi batas yang diijinkan apakah terlalu rendah maupun terlalu tinggi. Jika frekuensi sudah mencapai titik inisebuah sistem tidak diijinkan untuk tetap beroperasi. *Continues operation* merupakan daerah frekuensi normal dimana seharusnya sebuah sistem kelistrikan bekerja.

### 2.7.2. Standar Tegangan [7]

Standar tegangan yang digunakan adalah berdasarkan standar IEEE 1159-1995, menurut standar tersebut bahwa standar tegangan untuk operasi normal adalah antara 90-110%. Drop tegangan maksimal yang diijinkan oleh standar ini adalah 10%. Apabila tegangan kurang dari 90% maka hal tersebut dinamakan voltage sag dan apabila lebih dari 110% maka dinamakan voltage swell. Waktu yang diijinkan adalah maksimal 1 menit.

Untuk lebih jelasnya perhatikan gambar berikut ini :



**Gambar 2.7** Standar Batas Operasi Tegangan Berdasarkan IEEE 1159-1995

### 2.7.3. Standar Pelepasan Beban [6]

Pada Standar Pelepasan terdapat dua skema pelepasan beban yang diambil dari standar ANSI/IEEE C37.106-1987 yaitu pelepasan beban tiga langkah dan pelepasan beban enam langkah.

Tabel di bawah merupakan skema pelepasan beban tiga langkah dan enam langkah berdasarkan standar ANSI/IEEE C37.106-1987.

Pada tugas akhir ini digunakan skema *load shedding* 3 langkah. Load shedding pertama dilakukan ketika frekuensi 98.83%, dan jumlah beban yang dilepas adalah 10% dari beban total, dan waktu CB membuka adalah 0,12 s dari waktu gangguan. Jika dengan load shedding pertama sistem belum dicapai kestabilan maka diperlukan load shedding tahap kedua. Untuk load shedding kedua dilakukan ketika frekuensi mencapai 98.16%, besar beban yang dilepas adalah 15% dari beban total. Jika dengan dilakukannya load shedding tahap 2 sistem belum stabil, maka perlu dilakukan load shedding ketiga. Load shedding ketiga dilakukan ketika frekuensi sistem 97,5 % dan besar beban yang dilepas disesuaikan dengan kekurangan suplai daya dari load shedding kedua atau dapat dikatakan dicapai hingga stabil. Detail mekanisme pelapasan beban dapat dilihat pada tabel tabel di bawah ini

**Tabel 2.1** Skema Pelepasan Beban Tiga Langkah Sistem 60 Hz

<b>Tahap</b>	<b>Frekuensi (Hz)</b>	<b>Persentase Pelepasan Beban (%)</b>	<b>Waktu (s)</b>
1	59.3	10	0.12
2	58.9	15	0.12
3	58.5	<i>As required to arrest decline before 58.2(97%) Hz</i>	

**Tabel 2.2** Skema Pelepasan Beban Enam Langkah Sistem 60 Hz

Tahap	Frekuensi (Hz)	Persentase Pelepasan Beban(%)	Waktu (s)
1	59,5	10	0.12
2	59,2	10	0.12
3	58,8	5	0.12
4	58,8	5	0.28
5	58,4	5	0.28
6	58,4	5	0.42

**Tabel 2.3** Skema Pelepasan Beban Tiga Langkah Sistem 60/50 Hz

Tahap	Frekuensi (Hz)		%	Persentase Pelepasan Beban(%)	Waktu (s)
	Sistem 60(Hz)	Sistem 50 Hz)			
1	59.3	49.41	98.83	10	0.12
2	58.9	49.08	98.16	15	0.12
3	58.5	48.75	97.5	<i>As required to arrest decline before 58.2(97%) Hz</i>	

### BAB III

#### SISTEM KELISTRIKAN PADA PT. ANEKA TAMBANG POMALAA

##### 3.1 Sistem Kelistrikan di PT. Aneka Tambang Pomalaa

PT. Aneka Tambang (PT. ANTAM) merupakan badan usaha milik negara (BUMN) yang bergerak dalam bidang eksplorasi, pertambangan, pengolahan serta pemasaran dari sumber daya mineral. Sistem kelistrikan PT. ANTAM sebelumnya memiliki 10x5805 kW dan 8x17076 kW yang namun sekarang telah ditambahkan generator baru sebesar 2x31875 kW. Namun pada konfigurasi sistem yang baru terjadi penggantian generator sebesar 10x5805 kW yang merupakan pembangkit tenaga diesel untuk diganti dengan pembangkit tenaga uap sebesar 2x31875 kW. Estimasi beban pada PT.Antam adalah sekitar 160 MW. Sehingga sistem yang baru memiliki kapasitas sebesar 8x17076 kW dan 2x31876 kW. Semua generator ini terhubung pada bus 30kV yang berguna sebagai *synchronizing* bus. Kumpulan pembangkit lama dan pembangkit baru dihubungkan dengan trafo berkapasitas 30MVA.

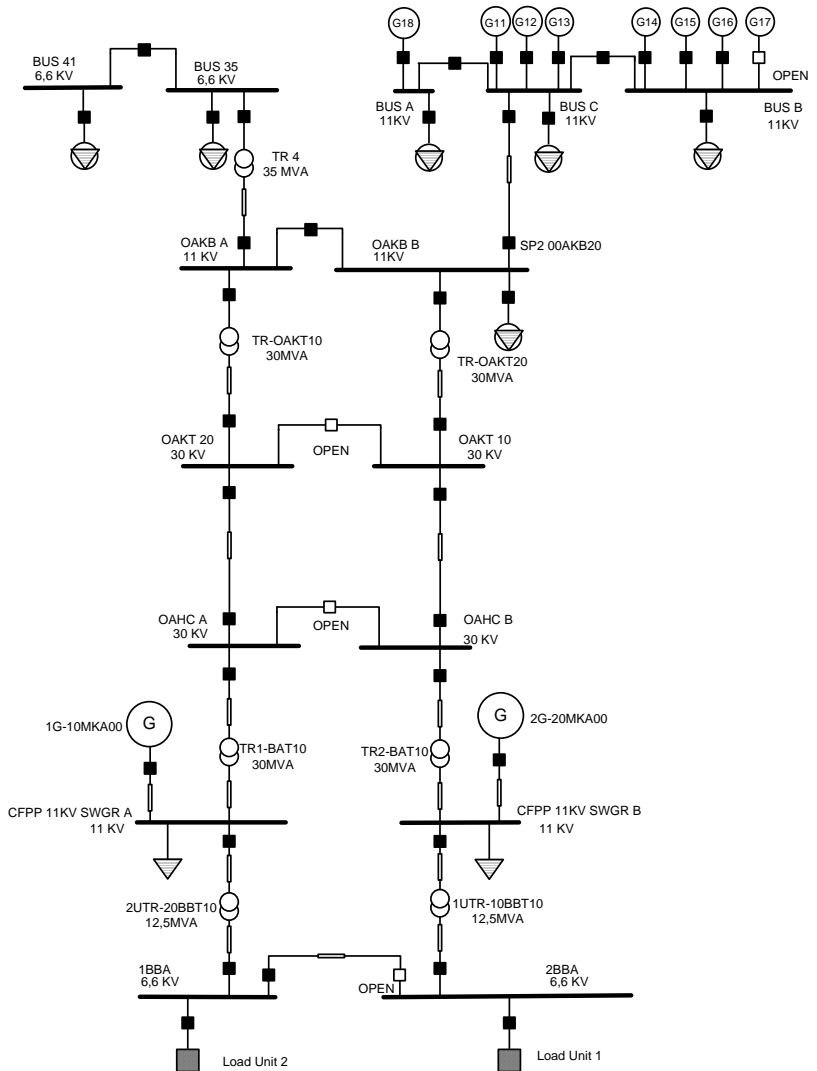
##### 3.2. Data Kelistrikan PT. Aneka Tambang Pomalaa

###### 3.2.1 Jumlah Total Pembangkitan, Pembebanan, dan Permintaan PT. Aneka Tambang Pomalaa

**Tabel 3.1** Jumlah Total Pembangkitan, Pembebanan, dan Permintaan PT. Aneka Tambang Pomalaa

Keterangan	MW	Mvar	MVA	% PF
Swing Generator	99.97	67.28	120.50	82.96 Lag
Non Swing Generator	60.00	7.59	60.47	99.21 Lag
Total Demand	159.97	74.87	176.62	90.57 Lag
Total Motor Load	93.41	38.25	100.94	92.54 Lag
Total Static Load	65.44	10.40	66.27	98.76 Lag





**Gambar 3.1** Single Line Diagram PT. Aneka Tambang Pomalaa Eksisting Yang Telah Disederhanakan.

### 3.3 Sistem Pembangkitan dan Distribusi PT.Aneka Tambang

#### 3.3.1. Pembangkitan PT. Aneka Tambang Pomalaa

PT. ANTAM Pomala memiliki total 9 pembangkit, yaitu 7x17MW dan 2x32MW. Pembangkit G18 berkapasitas 17 MW terletak pada Bus A 11 kV yang dihubungkan oleh trafo sebesar 60 MVA. Bus C memiliki 3 pembangkit yaitu G11, G12 dan G13 terhubung pada bus 11kV yang mensuplai beban sebesar 36.5MVA melalui trafo 45MVA. Selanjutnya Bus B yang memiliki 3 buah pembangkit G14, G15 dan G16 yang berkapasitas 3x17MW. Dan ketiga bus A,B,C ini saling terkoneksi dalam *Power Plant 3*. Kemudian terdapat 2 generator baru yang dibangun dengan kapasitas 2x32MW untuk menggantikan generator lama yang berkapasitas 10x5805 kW pada *Power Plant 2*. Kedua generator baru ini terinterkoneksi dengan pabrik-pabrik lama melalui *synchronizing* bus 30kV. Untuk data generator yang lebih jelas perhatikan tabel dibawah ini :

**Tabel 3.2** Data Generator Pada PT.Aneka Tambang Pomalaa

Spesifikasi	Generator Berkapasitas 17 MW	Generator Berkapasitas 32 MW
Rating	17 MW	32 MW
Normal Operasi	14.2 MW	30 MW
Tegangan	11 kV	11 kV
Frekuensi	50 Hz	50 Hz
Kecepatan	500 RPM	1500 RPM
Power Factor	80%	85%
FLA	1120 A	1968 A
Tipe Eksitasi	AC8B	AC8B
Tipe Governor	2301	505
H	0.707	1.226
Damping	0	0

**Tabel 3.3** Data Generator Pada PT.Aneka Tambang Pomalaa (Lanjutan)

<b>Impedansi (%) Generator</b>	<b>Generator Berkapasitas 17 MW</b>	<b>Generator Berkapasitas 32 MW</b>
<b>DirectAxis Synchronous Reactance (Xd)</b>	99	213
<b>Direct Axis Transient Reactance (Xd')</b>	36,4	35
<b>Direct Axis sub-transient Reactance (Xd'')</b>	22,1	20
<b>Negative Sequence Reactance (X2)</b>	22,1	17
<b>Zero Sequence Reactance (X0)</b>	11,7	7
<b>Quadrature Axis Synchronous Reactance (Xq)</b>	66	66
<b>Quadrature Axis Transient Reactance (Xq')</b>	66	66
<b>Quadrature Axis sub-transient Reactance (Xq'')</b>	22	33
<b>Transient Direct Axis Open Circuit Transient (T'do)</b>	7,22 sec	9,5 sec

**Tabel 3.4** Setting Exciter Generator Tipe AC8B

Parameter	Definition	AC8B
<b>VRmax</b>	Maximum value of the regulator output	10
<b>Vrmin</b>	Minimum value of the regulator output	0
<b>Vbmax</b>	The value of excitation function at Efdmax	-
<b>KA</b>	Regulator gain (p.u)	1
<b>KE</b>	Exciter constant for self-excited field (p.u)	1
<b>KF</b>	Regulator stabilizing circuit gain (p.u)	0.02
<b>KI</b>	Current circuit gain coefficient	2.4
<b>KP</b>	Potential circuit gain coefficient	1.2
<b>XL</b>	Reactance associated with potential source	0.8
<b>TA</b>	Regulator amplifier time constant (sec)	0.15
<b>TE</b>	Exciter time constant (sec)	0.5
<b>TF</b>	Regulator stabilizing circuit second time constant (sec)	0.3

**Tabel 3.5** Setting Governor Tipe 2301 Pada Generator 17 MW

Parameter	Definition	2301
<b>Mode</b>	Droop or Isoch	Droop
<b>Droop</b>	Steady-state speed droop (%)	5
<b>Θ Max</b>	Max. shaft position in degrees	42
<b>Θ Min</b>	Min. shaft position in degrees	0
<b>α</b>	Gain setting	0.8273
<b>β</b>	Reset setting	0.165
<b>ρ</b>	Actuator compensation setting	0.2
<b>K1</b>	Partially very high pressure power fraction	271.6
<b>τ</b>	Actuator time constant (sec)	0.1
<b>T1</b>	Engine Dead Time Constant (sec)	0.025
<b>T2</b>	Amplifier / compensator time constant (sec)	0.01
<b>P max</b>	Maximum shaft power (MW)	17975
<b>P min</b>	Minimum shaft power (MW)	0

**Tabel 3.6** Setting Governor Tipe 505 Pada Generator 32 MW

<b>Parameter</b>	<b>Definition</b>	<b>Governor 505</b>
<b>Mode</b>	Droop or Isoch	Droop
<b>Droop1</b>	Steady-state speed droop	4%
<b>Droop2</b>	Extraction loop droop	4%
<b>Efmax</b>	Max. extraction flow	162 T/Hr
<b>ExtFlow</b>	Turbine extraction flow	1%
<b>ExtPress</b>	Extraction pressure	1%
<b>Hpa</b>	Min. extraction @ max. power	84 T/Hr
<b>HPb</b>	Max. extraction @ min. power	172 T/Hr
<b>HPc</b>	Min. extraction @ min. power	30 T/Hr
<b>Hpmax</b>	Max. HP flow	172 T/Hr
<b>I1 &lt;D&gt;</b>	Speed loop integral	6%
<b>I1 &lt;I&gt;</b>	Speed loop integral gain in	6%
<b>I2</b>	Extraction loop integral gain	6%
<b>L1</b>	Up limit for speed loop output	100%
<b>L2</b>	Low limit for speed loop output	-30%
<b>L3</b>	Up limit for extraction loop output	100%
<b>L4</b>	Low limit for extraction loop output	0%
<b>P1 &lt;D&gt;</b>	Speed loop proportional	3%
<b>P1 &lt;I&gt;</b>	Speed loop proportional gain	3%
<b>P2</b>	Extraction loop proportional gain	3%
<b>RampRate</b>	Speed reference ramp rate	0.03%/Sec
<b>Sa</b>	Max. power @ min. extraction	24865 kW
<b>Sb</b>	Min. power @ max. extraction	9600 kW
<b>Sc</b>	Min. power @ min. extraction	-400 kW
<b>SDR1</b>	Speed loop parameter (Droop mode)	5%
<b>SDR1 &lt;I&gt;</b>	Speed loop parameter (Isoch mode)	5%
<b>SDR2</b>	Extraction loop parameter	5%
<b>Smax</b>	Max. power	30000 kW
<b>Ta1</b>	HP valve actuator time constant	1 Sec.
<b>Ta2</b>	LV valve actuator time constant	1 Sec.
<b>Tm1</b>	Turbine time constant	1 Sec.
<b>Tm2</b>	Turbine time constant (extraction flow)	1 Sec.
<b>TS</b>	Controller sample time	0.015 Sec.

### 3.3.2. Sistem Distribusi

Tegangan yang digunakan dalam sistem distribusi PT. Aneka Tambang Pomalaa terdiri dari empat level tegangan yang berbeda yaitu 30 kV, 11 kV, 6.6 kV, dan 0.4 kV. PT. Aneka Tambang Pomalaa menggunakan sistem distribusi radial dengan *Synchronizing* bus pada level tegangan 30 kV. *Synchronizing* bus digunakan sebagai interkoneksi sistem kelistrikan pada pembangkit lama dengan pembangkit yang baru dibangun. Sehingga jika terjadi gangguan pada salah satu pabrik, beban pabrik tetap dapat disuplai oleh pembangkit lainnya.

**Tabel 3.7** Setting Transformator pada PT.Aneka Tambang Pomalaa

No	ID Transformator	Daya (MVA)	Tegangan (kV)		%Z	X/R
			Primer	Sekunder		
1	TR 1	60	11	33	15	45
2	TR 3	65	11	33	15	45
3	TR 4	35	6.9	11	10	45
4	TR 5	12.5	11	6.6	8	13
5	TR 8903	45	11	31.5	12.5	45
6	2UTR-20	12.5	11	6.8	8	13
7	2GTR-20	37.5	30	11	12.5	45
8	2MTR-OA	37.5	11	30	12.5	45
9	2DTRA-20	1.5	6.6	0.4	6	6
10	1UTR-10	12.5	11	6.6	8	13
11	1MTR-OA	37.5	11	30	12.5	45
12	1GTR-10	37.5	30	11	12.5	45
13	1DTRA-10	1.5	6.6	0.4	6	6
14	0DTRA-00	2.5	6.6	0.4	8	6

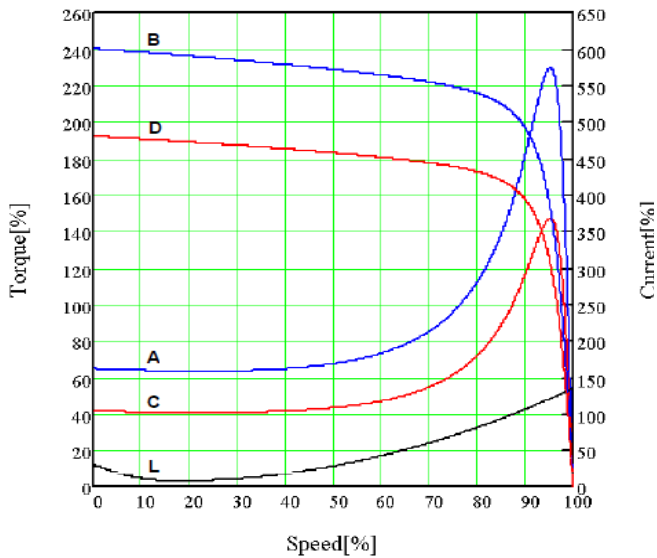
### 3.3.3. Data Beban dan Data Motor Terbesar

Jumlah beban yang terpasang pada PT. Aneka Tambang Pomalaa memiliki total *demand* sebesar kurang lebih 160 MW dengan rincian *motor load* sejumlah 93.41 MW dan *static load* sejumlah 65.44 MW. Diantara motor motor tersebut yang paling besar dan sedang beroperasi adalah motor M-BFP1A, M-BFP1B, M-BFP2A dan M-BFP2B berkapasitas masing-masing 930 kW yang terletak pada level

tegangan 6.6 KV. Untuk detail data motor dapat dilihat pada tabel berikut ini :

**Tabel 3.8** Data Motor Terbesar Pada PT.Aneka Tambang Pomalaa

Motor ID	Boiler Feed Water Pump
Kapasitas	930 kW
LRC (Locked Rotor Current)	600%
PF Locked Rotor	14.53%
Xsc 1/2 cycle	16.67%
Xsc 1.5-4 cycle	25%
Xo	15.385
X2	15.385
Td'	0.2
X/R	26.506
LR T	65%
Max T	230%



**Gambar 3.2** Kurva Karakteristik Torsi-Kepcepatan Pada Motor *Boiler Feed Water Pump*

## **BAB IV**

### **ANALISIS KESTABILAN TRANSIEN PADA PT. ANEKA TAMBANG POMALAA**

#### **4.1 Analisis Kestabilan Transien**

Analisa kestabilan Transien perlu dilakukan terhadap sistem kelistrikan yang baru atau sistem kelistrikan yang telah mengalami perubahan konfigurasi. Hal ini perlu dilakukan karena setiap sistem kelistrikan pasti memiliki gangguan di masa depan, Saat sistem tersebut mengalami gangguan maka akan terjadi perubahan pada kestabilan di sistem tersebut, periode antara sebelum terjadi gangguan, saat terjadi gangguan dan setelah terjadi gangguan akan mengubah nilai-nilai kestabilan frekuensi, tegangan dan sudut rotor. Maka dari itu kita perlu menganalisa kestabilan transien pada sistem sehingga saat terjadi gangguan nilai-nilai kestabilan tersebut dapat kembali ke operasi normal yang sesuai dengan standar yang ada dan juga menemukan solusi untuk sistem kelistrikan agar mampu bekerja secara kontinyu setelah terjadi gangguan. Analisa kestabilan transien dapat disimulasikan menggunakan program ETAP 11.00 , dengan memodelkan single line diagram sistem kelistrikan PT. Aneka Tambang Pomalaa , data-data yang dimasukkan dalam pemodelan harus berdasarkan data yang asli atau valid sehingga kita mampu memodelkan sistem semirip mungkin dengan sistem kelistrikan yang asli, hal ini telah dibahas sebelumnya di bab 3. Dalam program ini kita juga dapat memodelkan beberapa jenis gangguan yang mungkin terjadi pada sistem sehingga kita dapat menganalisa kestabilan transien setelah terjadi gangguan. Beberapa gangguan yang menjadi kasus dalam tugas akhir ini adalah gangguan *generator outage*, *short circuit* dan *motor starting*.



## 4.2 Pemilihan Studi Kasus

Gangguan pada kestabilan transien hampir selalu terjadi pada gangguan yang bersifat jangka pendek. Seperti yang kita ketahui bahwa gangguan jangka pendek yang terjadi pada sistem akan mempengaruhi kestabilan frekuensi, tegangan dan sudut rotor. Berikut ini adalah kasus-kasus yang akan dibahas pada tugas akhir ini

### 4.2.1 Generator Outage :

Kasus ini mendiskripsikan efek dari lepasnya generator pada sistem sehingga membuat sistem kelistrikan akan mengalami penurunan daya pembangkitan. Pada studi kasus generator outage, dilakukan studi kasus dengan lepasnya satu dan maksimal dua generator saat sistem beroperasi normal.

Berikut ini adalah alasan pemilihan kasus generator outage :

- Generator *outage* mampu menyebabkan *blackout* pada sistem kelistrikan, atau generator lain juga akan ikut terlepas disebabkan karena kurangnya daya pembangkitan pada sistem.
- Generator *outage* menyebabkan penurunan frekuensi dan tegangan yang paling besar secara seketika sehingga merupakan *worst case scenario* pada sistem kelistrikan.
- Gangguan pada kestabilan transien biasanya adalah gangguan yang sangat cepat atau jangka pendek namun memiliki dampak besar terhadap kestabilan sistem, sehingga dapat dikatakan sebagai *large disturbance*. Sehingga dipilih kasus generator lepas untuk mensimulasikan kestabilan transien pada sistem tersebut
- Gangguan lain seperti gagalnya saluran transmisi atau gagalnya trafo mampu berujung sebagai kasus lepasnya generator dan juga memungkinkan terjadi *overspeed* pada salah satu generator karena pengurangan beban secara tiba-tiba sehingga harus dilakukan generator *shedding*, yang memiliki efek yang sama seperti generator *outage*.

### **Pemilihan Kasus :**

Pada sistem kelistrikan PT.Aneka Tambang Pomalaa memiliki 7 generator 17 MW pada *Power Plant 3* dan 2 generator *Steam Turbin* berkapasitas 32 MW, kasus yang dipilih adalah kombinasi dari kedua jenis generator tersebut mengingat kedua jenis generator tersebut memiliki tipe dan *datasheet* yang identik bagi kapasitas masing-masing maka kasus generator outage yang akan dianalisa adalah sebagai berikut:

1. G11 (Generator berkapasitas 17 MW)
2. STG-2G (Generator berkapasitas 32 MW)
3. G11 dan G18 (Generator berkapasitas 2x17 MW)
4. G11 dan STG-2G (Generator berkapasitas 17 MW dan 32MW)
5. STG-1G dan STG-2G (Generator berkapasitas 2x32MW)

### **Cara Mengatasinya :**

Metode yang digunakan untuk kasus-kasus seperti ini adalah *load-shedding*, metode ini digunakan karena saat generator outage maka suatu sistem akan mengalami defisit pembangkitan sekaligus penurunan frekuensi, tegangan dan perubahan sudut rotor sehingga diperlukan untuk pelepasan beban yang mencukupi untuk menyeimbangkan dan mengembalikan sistem ke operasi yang stabil. standar frekuensi yang digunakan adalah standar **IEEE Std C37.106-2003** sedangkan untuk standar tegangan yang digunakan adalah standar **IEEE 1159-1995**, standar load-shedding yang akan digunakan adalah **ANSI/IEEE C37.106-1987** yaitu load-shedding 3 tahap dengan menggunakan relay *underfrequency* atau disebut *load shedding* frekuensi dan juga menggunakan *lockout relay* atau disebut dengan *load shedding* status, kemudian kedua *load-shedding* ini akan dibandingkan.

Dalam kasus generator *outage*, bus yang digunakan sebagai indikator kestabilan sistem antara lain :

1. Bus 00AHC20 untuk mewakili level tegangan 33 kV *Transmission*
2. Bus CFPP 11KV SWGR A untuk mewakili level tegangan 11 kV *Switchgear A*
3. Bus CFPP 11KV SWGR B untuk mewakili level tegangan 11 kV *Switchgear B*
4. Bus PP-2 untuk mewakili level tegangan 6.6 kV *Power Plant 2*
5. Bus 10BBA untuk mewakili level tegangan 6.6 kV *Load Unit 1*

#### 4.2.2 Short Circuit :

Kasus ini menggambarkan gangguan hubung singkat dan juga response transien pada sistem kelistrikan setelah terjadi gangguan ini.

Berikut ini adalah alasan pemilihan kasus *short circuit* :

- Saat *short circuit* maka akan terjadi arus sesaat yang sangat besar mengalir pada sistem dan apabila mampu diamankan dengan baik maka akan terjadi pelepasan beban pada sistem kelistrikan sehingga perlu diwaspadai apabila terjadi perubahan beban yang sangat signifikan akan menyebabkan gangguan kestabilan transien.
- Pelepasan beban yang cukup besar membuat gangguan pada kestabilan frekuensi dan juga menyebabkan generator *overspeed* dan pada akhirnya lepasnya generator.

#### Pemilihan Kasus :

Pemilihan kasus pada Arus hubung singkat ini adalah dengan meninjau nilai arus hubung singkat yang paling besar di beberapa level tegangan. Jenis arus hubung singkat yang digunakan adalah hubung singkat 3 fasa ke tanah, dimana gangguan jenis ini memiliki nilai arus hubung singkat yang paling besar dari pada jenis hubung singkat lainnya. Berikut ini adalah beberapa kasus yang akan digunakan sebagai studi:

1. Gangguan hubung singkat 3 fasa ketanah pada bus 30 kV 00AHC20
2. Gangguan hubung singkat 3 fasa ketanah pada bus 6.6 kV PP-2
3. Gangguan hubung singkat 3 fasa ketanah pada bus 0.4 kV 00BFA

#### Cara Mengatasinya :

Cara penanggulangan kasus hubung singkat ini adalah dengan menggunakan skema pengaman yang telah ada dan perlu diperhatikan waktu pemutusan, yaitu dengan memutus semua hubungan pada bus yang terjadi gangguan. Hal ini dilakukan supaya arus besar yang dihasilkan oleh gangguan ini tidak menyalur ke bus-bus yang lain ataupun ke peralatan di sistem kelistrikan. Dengan adanya pemutusan pada bus yang memiliki gangguan maka akan terjadi perubahan beban yang signifikan pada sistem kelistrikan sehingga akan mengganggu kestabilan transien yang meliputi kestabilan frekuensi, tegangan dan sudut rotor. Dengan adanya gangguan ini maka frekuensi akan melesat tinggi dikarenakan oleh pengurangan beban secara tiba-tiba, kecepatan

generator yang memikul beban yang hilang tersebut akan melonjak melebihi batas dan mampu menyebabkan rusaknya generator. Apabila hal ini terjadi maka harus dilakukan generator shedding yaitu tindakan untuk mematikan generator sehingga nilai antara daya pembangkitan dan daya output dapat seimbang kembali.

Dalam kasus *short circuit*, bus yang digunakan sebagai indikator kestabilan sistem adalah :

- Kasus *Short Circuit* bus 00BFA (0.4 kV):  
Bus 00AHC10 (30 kV), Bus CFPP 11KV SWGR A (11 kV),  
Bus CFPP 11KV SWGR B (11 kV), Bus 20BBA (6.6 kV),  
Bus 10BFA (0.4 kV)
- Kasus *Short Circuit* bus PP-2 (6.6 kV):  
Bus 00AHC10 (30 kV), Bus CFPP 11KV SWGR A (11 kV),  
Bus CFPP 11KV SWGR B (11 kV), Bus 10BBA (6.6 kV),  
Bus 00BFA (0.4 kV)
- Kasus *Short Circuit* bus 00AHC20 (30 kV) :  
Bus 00AHC10 (30 kV), Bus CFPP 11KV SWGR A (11 kV),  
Bus CFPP 11KV SWGR B (11 kV), Bus 10BBA (6.6 kV),  
Bus 00BFA (0.4 kV)

#### **4.2.3 Motor Starting :**

Kasus ini mendiskripsikan efek dari starting motor terbesar pada sistem dan dampaknya terhadap penurunan nilai-nilai kestabilan.

Berikut ini adalah alasan pemilihan kasus motor starting :

- Pada saat starting motor terdapat arus sesaat yang memiliki nominal yang cukup besar, karena kebutuhan arus yang besar diserap oleh motor, hingga 6 kali arus nominal.
- Arus yang besar yang mengalir pada suatu titik pada sistem akan menyebabkan penurunan frekuensi dan drop tegangan yang cukup signifikan tergantung dari seberapa besar kapasitas motor yang dihidupkan.

#### **Pemilihan Kasus :**

Pemilihan kasus untuk motor starting adalah dengan memilih kapasitas motor terbesar yang dimiliki oleh sistem. Dalam kasus ini dipilih motor *Feed Water Pump* M-BFP1A yang memiliki kapasitas sebesar 930 kW yang terpasang pada sistem kelistrikan PT.ANTAM POMALAA . Metode starting motor yang digunakan yaitu DOL (*Direct On Line*)

sehingga pada kasus yang digunakan pada simulasi yaitu dengan menghubungkan *switch* ON (*close* CB) pada sistem.

#### **Cara Mengatasinya :**

Saat terjadi motor starting maka tegangan akan menurun drastis namun setelah itu biasanya akan berangsur-angsur stabil pada titik tegangan tertentu. Apabila titik kestabilan tegangan yang baru terlalu rendah atau tidak sesuai standar maka kita perlu menambahkan kapasitor bank pada bus motor tersebut, kapasitor bank disambungkan saat akan melakukan *motor starting* sehingga tegangan di bus motor tersebut naik melebihi angka normal operasi dalam waktu tertentu kemudian setelah motor telah berhasil di starting kapasitor bank tersebut dapat di lepas dari sistem agar tidak menyebabkan tegangan bus terlalu tinggi. Cara lain untuk mengatasi motor starting adalah dengan menggunakan soft starter. *Soft starter* adalah suatu alat yang mampu meredam arus dan torsi yang dihasilkan saat melakukan starting motor dengan memberikan tegangan yang dibutuhkan oleh motor secara bertahap sehingga kenaikan arus tidak terlalu ekstrim namun dengan menggunakan softstarting ini waktu yang dibutuhkan untuk starting motor cenderung lebih lama daripada metode *direct-on-line*.

Dalam kasus motor starting, bus yang digunakan sebagai indikator kestabilan sistem adalah

- Bus 00AHC20 (30 kV)
- Bus CFPP 11KV SWGR A (11 kV)
- Bus CFPP 11KV SWGR B (11 kV)
- Bus 10BBA (6.6 kV)
- Bus 00BFA (0.4 kV)

**Tabel 4.1** Studi Kasus Kestabilan Transien

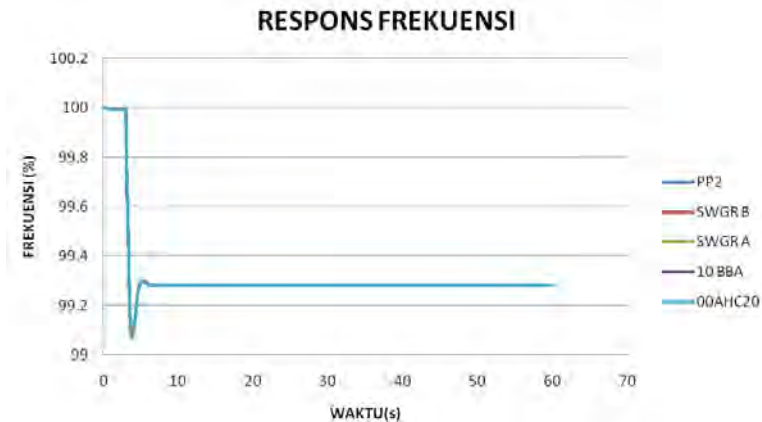
No	Kasus	Keterangan
1	<b>G11 off</b>	Generator G11 <i>outage</i> dari sistem
2	<b>STG-2G off</b>	Generator STG-2G <i>outage</i> dari sistem
3	<b>STG-2G off + LS</b>	Generator STG-2G <i>outage</i> dari sistem dilanjutkan dengan <i>Load Shedding</i> tahap 1
4	<b>G11 + G18 off</b>	Generator G11 dan G18 <i>outage</i> dari sistem
5	<b>G11 + G18 off + LS2</b>	Generator G11 dan G18 <i>outage</i> dari sistem dilanjutkan dengan <i>Load Shedding</i> tahap 1 dan tahap 2
6	<b>G11 + STG-2G off</b>	Generator G11 dan STG-2G <i>outage</i> dari sistem
7	<b>G11 + STG-2G off + LS2</b>	Generator G11 dan STG-2G <i>outage</i> dari sistem dilanjutkan dengan <i>Load Shedding</i> tahap 1 dan tahap 2
8	<b>STG-1G + STG-2G off</b>	Generator STG-1G dan STG-2G <i>outage</i> dari sistem
9	<b>STG-1G + STG-2G off+ LS3</b>	Generator STG-1G dan STG-2G <i>outage</i> dari sistem dilanjutkan dengan <i>Load Shedding</i> tahap 1, tahap 2 dan tahap 3
10	<b>SC 30KV</b>	Gangguan hubung singkat di bus 00AHC20 (30 kV) dilanjutkan dengan CB <i>open</i> setelah gangguan
11	<b>SC 6.6 kV</b>	Gangguan hubung singkat di bus PP - 2 (6.6 kV) dilanjutkan dengan CB <i>open</i> setelah gangguan
12	<b>SC 0.4 kV</b>	Gangguan hubung singkat di bus 00BFA (0.4 kV) dilanjutkan dengan CB <i>open</i> saat setelah gangguan
13	<b>Motor Starting M-BFP1A</b>	Motor Starting <i>Feed Water Pump</i> M-BFP1A (930 kW)

### 4.3 Hasil Simulasi Kestabilan Transien dan Mekanisme Load Shedding.

Pada sub-bab ini akan di jelaskan hasil dari analisis kestabilan transien meliputi respon frekuensi, tegangan pada bus yang telah dipilih sebelumnya dan sudut rotor generator dari setiap studi kasus yang telah disampaikan pada sub bab 4.2.

#### 4.3.1. Studi Kasus Generator G11 Lepas

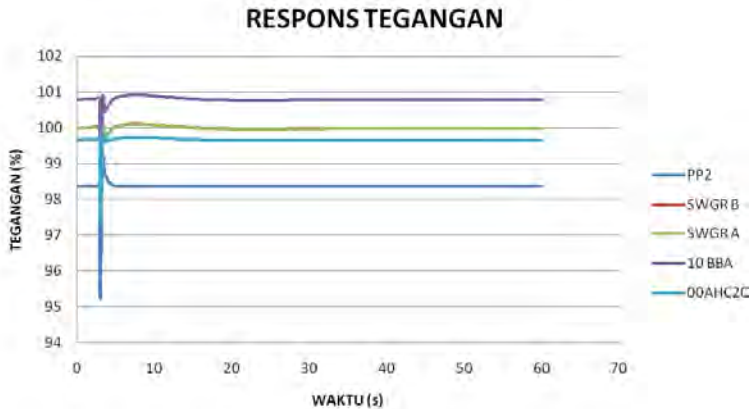
Pada studi kasus ini akan dijelaskan tentang kasus lepasnya salah satu generator pada PT.ANTAM yang memiliki kapasitas sebesar 17 MW. Kasus lepasnya generator ini terjadi pada saat  $t = 3.00$  detik sedangkan generator lainnya beroperasi normal dengan pembebanan penuh sesuai normal operasi. Pada kasus ini akan dilakukan analisa terhadap tegangan, frekuensi dan sudut rotor pada sistem sesaat setelah terjadi gangguan apakah nilai-nilai tersebut masih sesuai dengan standar yang digunakan atau tidak. Berikut ini adalah respons yang didapatkan melalui simulasi kasus G11 lepas :



**Gambar 4.1** Respons Frekuensi Pada Kasus G11 Lepas

Pada gambar 4.1 ditunjukkan respons frekuensi pada saat G11 lepas pada  $t = 3.00$  detik dengan waktu simulasi 60 detik. Dapat kita lihat pada gambar bahwa frekuensi mengalami penurunan, penurunan ini terjadi setelah lepasnya generator G11. Penurunan frekuensi terendah pada

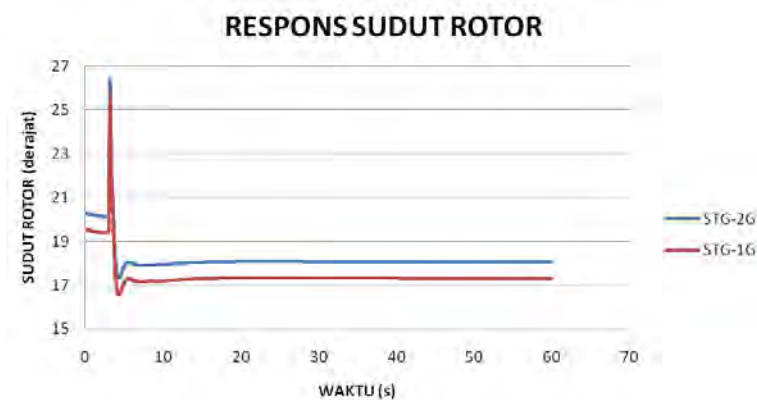
sistem adalah sebesar 99.06% pada saat  $t=3.84$  detik. Sistem kembali kedalam keadaan stabil pada frekuensi 99.28% pada  $t=5.76$  detik sehingga masih sesuai dengan standar frekuensi yang diperbolehkan untuk operasi normal.



**Gambar 4.2** Respons Tegangan Pada Kasus G11 Lepas

Pada gambar 4.2 menunjukkan respons tegangan pada berbagai bus yang telah dijelaskan pada sub-bab 4.2 mengenai pemilihan bus yang akan dianalisa. Pada gambar ini terlihat bahwa terdapat penurunan tegangan pada masing-masing bus dikarenakan oleh kasus G11 lepas. Bus PP2 mengalami penurunan hingga 95.2% pada saat  $t=3.06$  detik dan stabil pada 98.37% pada  $t=5.32$  detik. Bus SWGR B mengalami penurunan hingga 98.2% dan stabil pada 100.04%. Bus SWGR A mengalami penurunan hingga 98.2% dan stabil pada 100.04%. Bus 10BBA mengalami penurunan hingga 98.9% dan stabil pada 100.08%. Bus 00AHC20 mengalami penurunan hingga 97.33% dan kembali stabil pada 99.69% . Respons tegangan pada kasus lepasnya G11 ini memiliki penurunan tegangan hingga 95.2% dan stabil pada 98.2% yang terletak pada bus PP2 namun ini masih tergolong aman.



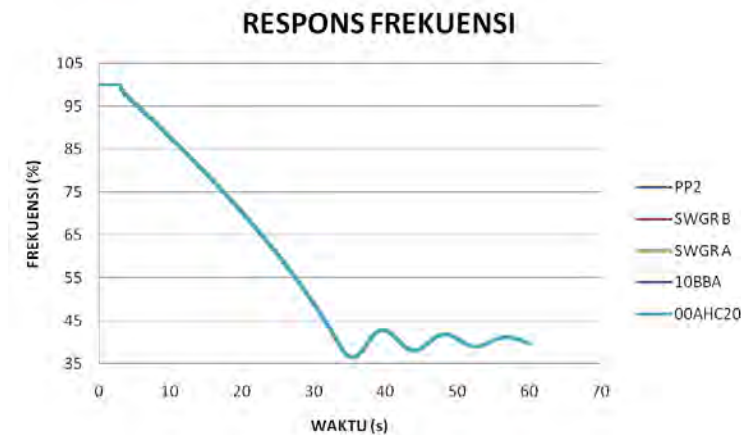


**Gambar 4.3** Respons Sudut Rotor pada kasus G11 lepas

Pada gambar 4.3 menunjukkan respons sudut rotor dari generator lainnya saat G11 lepas pada saat  $t=3.00$  detik . Terlihat bahwa hanya terjadi kenaikan sementara pada sudut generator STG-2G dari 20.28 derajat hingga 26.41 derajat pada  $t=3.18$  dan stabil pada 17.8 derajat sedangkan pada STG-1G yang memiliki nilai awal sebesar 19.54 meningkat hingga menjadi 25.64 derajat dan stabil pada 17.1 derajat. Berdasarkan hasil simulasi kasus G11 lepas di atas dapat disimpulkan bahwa pada kasus tersebut kondisi sistem masih dalam keadaan stabil melihat respon frekuensi, respon tegangan dan respon sudut rotor yang masih berada dalam standar yang diperbolehkan.

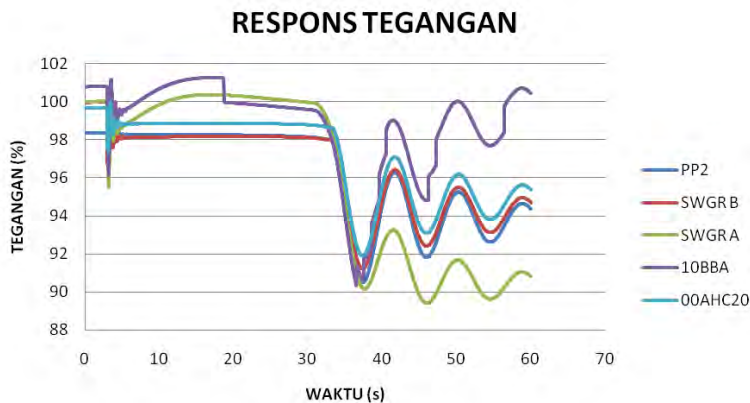
#### **4.3.2. Studi Kasus Generator STG-2G Lepas**

Pada studi kasus ini akan dijelaskan tentang kasus lepasnya salah satu generator pada PT.ANTAM yang memiliki kapasitas sebesar 32 MW. Kasus lepasnya generator ini terjadi pada saat  $t=3.00$  detik sedangkan generator lainnya beroperasi normal dengan pembebanan penuh sesuai normal operasi. Pada kasus ini akan dilakukan analisa terhadap tegangan, frekuensi dan sudut rotor pada sistem sesaat setelah terjadi gangguan apakah nilai-nilai tersebut masih sesuai dengan standar yang digunakan atau tidak. Apabila tidak perlu dilakukan pelepasan beban untuk mengembalikan sistem kedalam keadaan yang stabil. Berikut ini adalah respons yang didapatkan melalui simulasi kasus STG-2G lepas :



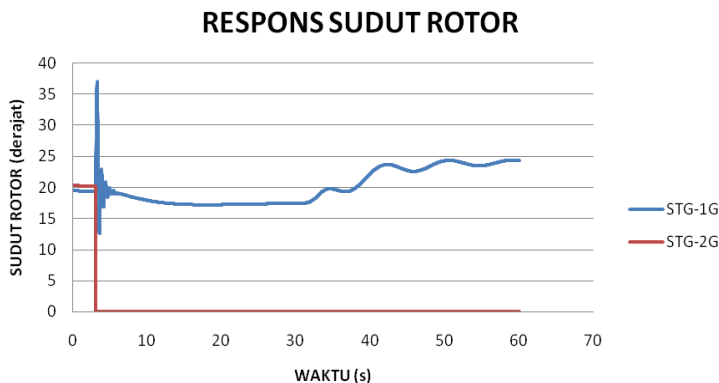
**Gambar 4.4** Respons Frekuensi pada kasus STG-2G lepas

Pada gambar 4.4 menunjukkan respons frekuensi pada saat STG-2G lepas pada  $t = 3.00$  detik dengan waktu simulasi 60 detik. Dapat kita lihat pada gambar bahwa frekuensi mengalami penurunan yang drastis, penurunan ini terjadi setelah lepasnya generator STG-2G. Penurunan frekuensi terendah pada sistem adalah sebesar 36.38% pada saat  $t = 35.32$  detik dan naik hingga nilai 42.52% dan setelah itu frekuensi terus berosilasi hingga  $t = 60$  detik. Sehingga pada kasus lepasnya STG-2G ini perlu dilakukan pelepasan beban sehingga mampu mengembalikan sistem kedalam keadaan yang stabil melihat respons frekuensi yang ada telah diluar standar yang diperbolehkan.



**Gambar 4.5** Respons Tegangan pada kasus STG-2G lepas

Pada gambar 4.5 ini terlihat bahwa terdapat penurunan tegangan dan osilasi pada masing-masing bus dikarenakan oleh lepasnya generator STG-2G . Bus 10BBA mengalami kenaikan tertinggi saat terjadi gangguan yaitu 101.32% pada  $t=3.50$  detik dan penurunan hingga 90.81% dan setelah itu akan berosilasi yang cenderung naik. Sedangkan untuk Bus SWGR A mengalami penurunan hingga 90.21% dan setelah itu berosilasi ke 90.82% pada  $t=60$  sekon. Respons tegangan terus berosilasi sehingga dapat dikatakan terjadi ketidak stabilan pada sistem.



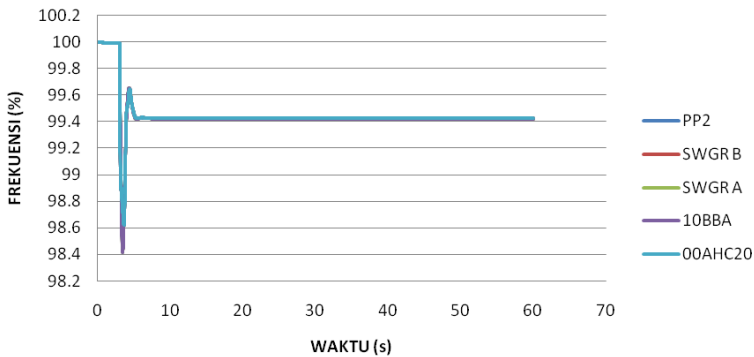
**Gambar 4.6** Respons Sudut Rotor Pada Kasus STG-2G Lepas

Pada gambar 4.6 menunjukkan respons sudut rotor dari generator lainnya saat STG-2G lepas pada waktu  $t=3.00$  detik. Terlihat bahwa hanya terjadi kenaikan sementara pada sudut generator STG-1G dari 19.54 derajat hingga 37.09 derajat pada  $t=3.22$  kemudian berosilasi menuju 17.24 namun setelah itu sudut rotor terus berosilasi cenderung naik hingga mencapai 24.34 derajat pada  $t=60$  detik sedangkan pada STG-2G yang memiliki nilai awal sebesar 20.28 menurun hingga menjadi 0 derajat karena generator STG-2G lepas dari sistem. Sedangkan pada generator. Berdasarkan hasil simulasi kasus lepasnya STG-2G di atas dapat disimpulkan bahwa pada kasus tersebut kondisi sistem dalam keadaan tidak stabil. Hal ini dapat diamati dari respons frekuensi yang terus menurun dan terjadinya osilasi pada respons tegangan dan sudut rotor tanpa menuju keadaan stabil.

#### **4.3.2.1. Studi Kasus Generator STG-2G Lepas dan Load Shedding**

Pada sub-bab ini akan dijelaskan mengenai mekanisme pelepasan beban untuk memberikan solusi terhadap kasus lepasnya generator STG-2G. Pada kasus lepasnya STG-2G terjadi penurunan frekuensi yang sangat drastis dan nilai tersebut sudah tidak dalam batas aman menurut standar frekuensi yang digunakan yaitu IEEE Std C37.106-2003 sehingga perlu dilakukan pelepasan beban atau *load shedding* sesuai dengan standar ANSI/IEEE C37.106-1987 yaitu load-shedding 3 tahap dengan menggunakan relay *underfrequency*. Pelepasan beban tahap 1 dilakukan saat frekuensi mencapai nilai 98.83% yaitu saat  $t= 3.24$  detik + delay 6 cycle (0.12 s) sehingga pelepasan beban tahap 1 dilakukan saat  $t=3.36$  detik. Jumlah beban yang dilepas menurut standar adalah 10% dari beban total sehingga diperoleh 15.98 MW.

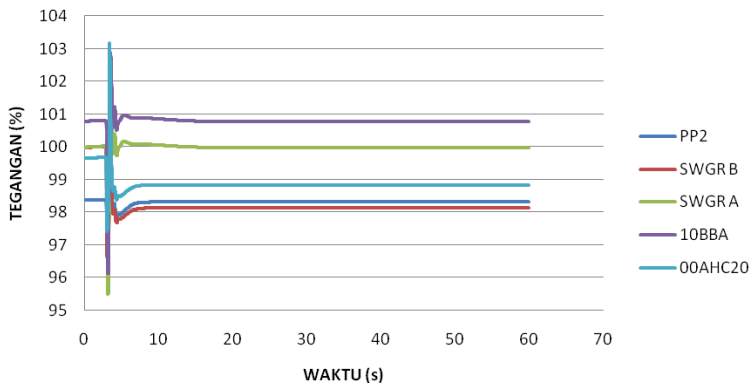
## RESPONS FREKUENSI



**Gambar 4.7** Respons Frekuensi pada kasus STG-2G Lepas dan Load Shedding

Pada Gambar 4.7 menunjukkan bahwa sistem kembali stabil setelah dilakukan pelepasan beban sesaat setelah terjadi gangguan. Pada gambar tersebut terlihat bahwa terjadi penurunan frekuensi hingga 98.41% pada  $t=3.61$  detik kemudian setelah dilakukan pelepasan beban frekuensi kembali naik hingga 99.61% dan kemudian stabil pada 99.4%.

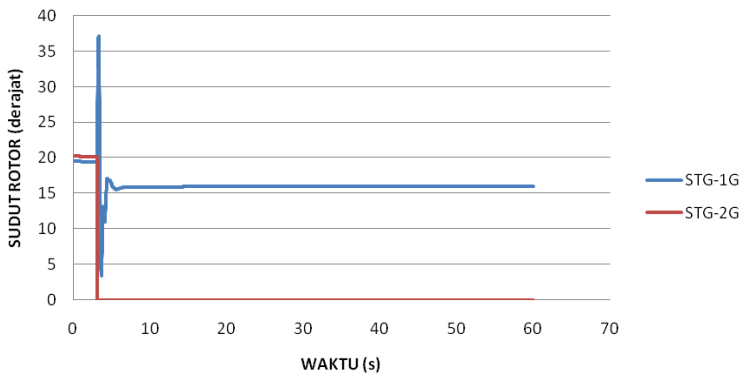
## RESPONS TEGANGAN



**Gambar 4.8** Respons Tegangan pada kasus STG-2G Lepas dan Load Shedding

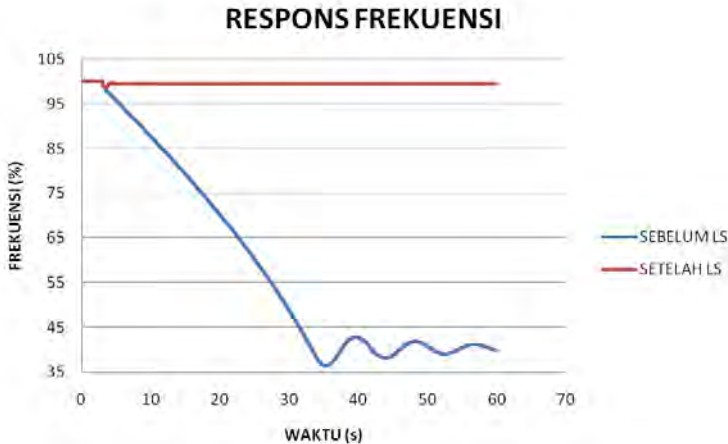
Pada Gambar 4.8 ini menunjukkan bahwa tegangan pada sistem tidak lagi beresilasi seperti saat terjadi gangguan. Tegangan pada Bus 00AHC20 naik hingga 103.09% dan stabil pada 98.83%, Bus 10BBA stabil pada 100.7%, Bus SWGR B stabil pada 98.13% , Bus PP2 stabil pada 98.34% dan Bus SWGR A mengalami penurunan hingga 95.63% namun setelah itu kembali stabil pada 99.96% sehingga semua bus masih tergolong aman dan sesuai dengan standar.

### RESPONS SUDUT ROTOR



**Gambar 4.9** Respons Sudut Rotor pada Kasus STG-2G Lepas dan Load Shedding

Pada gambar 4.9 menunjukkan respons sudut rotor dari generator lainnya saat STG-2G lepas pada saat  $t=3.00$  detik dan load shedding pada  $t=3.36$  detik. Terlihat bahwa hanya terjadi kenaikan sementara pada sudut generator STG-1G dari 19.54 derajat hingga 37.09 derajat pada  $t=3.22$  detik kemudian turun hingga mencapai nilai 3.4 derajat pada saat  $t=3.58$  detik namun setelah itu sudut rotor stabil pada 15.8 derajat sedangkan pada STG-2G yang memiliki nilai awal sebesar 20.28 menurun hingga menjadi 0 derajat karena generator STG-2G lepas dari sistem. Berdasarkan hasil simulasi kasus lepasnya STG-2G dan *load shedding* di atas dapat disimpulkan bahwa respons frekuensi, tegangan dan sudut rotor pada kasus tersebut telah berada pada standar yang diperbolehkan.



**Gambar 4.10** Perbandingan Frekuensi Pada Kasus STG-2G Lepas

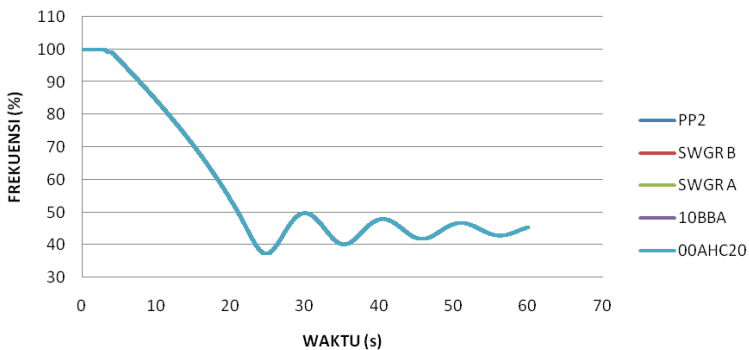
Gambar 4.10 menunjukkan perbandingan respons frekuensi pada saat sebelum dan sesudah dilakukan mekanisme load shedding. Terlihat pada saat sebelum dilakukan load shedding bahwa terjadi penurunan yang sangat drastis hingga 36.38% pada saat  $t=35.32$  dan setelah itu frekuensi terus berosilasi. Hal ini terjadi dikarenakan jumlah daya pembangkitan pada sistem lebih kecil daripada beban yang dipikul oleh sistem sehingga perlu dilakukan pelepasan beban sehingga tidak terjadi penurunan frekuensi yang drastis. Mekanisme pelepasan beban tahap 1 dilakukan pada saat  $t=3.36$  detik dan jumlah beban yang dilepaskan adalah sebesar 10% dari beban total yaitu 15.98 MW, setelah dilakukan pelepasan beban terlihat bahwa frekuensi mengalami kenaikan dan stabil kembali pada 99.4% sehingga frekuensi telah sesuai dengan standar yang digunakan.

#### 4.3.3. Studi Kasus Generator G11 dan G18 Lepas

Pada studi kasus ini akan disimulasikan kasus lepasnya dua generator pada PT.ANTAM. Generator G11 dan G18 akan lepas secara bertahap masing-masing pada  $t= 3.00$  detik dan  $t= 4.00$  detik, kedua generator ini memiliki kapasitas yang sama yaitu 17 MW. Pada kasus ini dua generator lepas dari sistem namun tujuh generator lain masih bekerja

normal dan memiliki beban penuh dari operasi normal. Setelah mendapatkan respons frekuensi pada saat gangguan dilakukan analisa apakah respons frekuensi, tegangan dan sudut rotor telah sesuai dengan standar. Apabila tidak maka akan dilakukan mekanisme load shedding. Berikut ini adalah gambar dari respons frekuensi, respons tegangan dan respons sudut rotor :

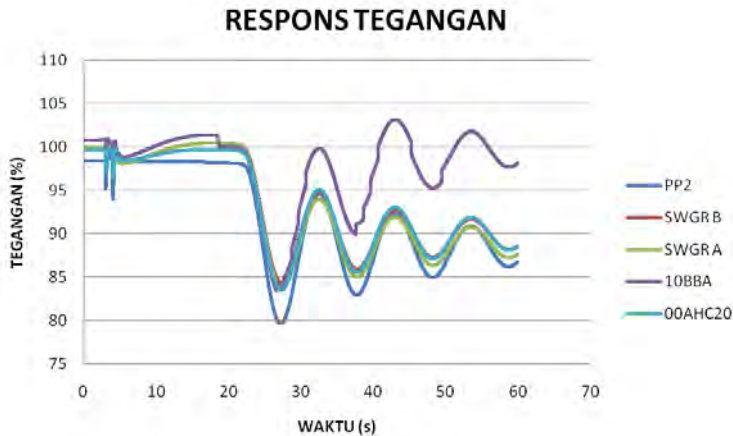
### RESPONS FREKUENSI



**Gambar 4.11** Respons Frekuensi Pada Kasus G11 dan G18 Lepas

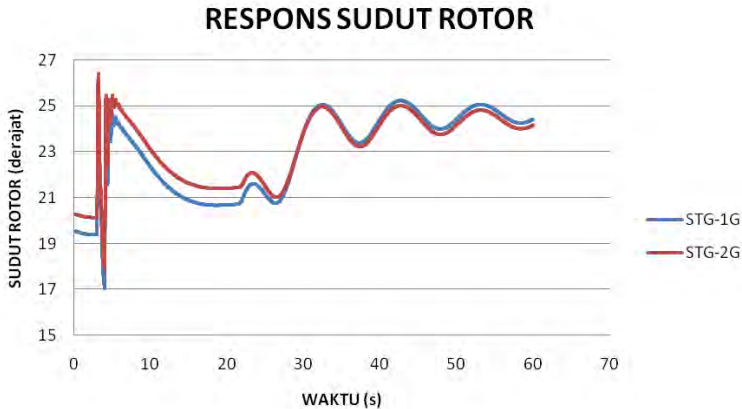
Gambar 4.11 menunjukkan bahwa mulai terjadi penurunan frekuensi setelah  $t = 4.00$  detik yaitu sesaat setelah lepasnya kedua generator tersebut. Frekuensi mengalami penurunan hingga 37.32% pada  $t = 24.91$  detik dan beresilasi hingga mencapai 45.43% pada  $t = 60$  detik. Penurunan frekuensi pada kasus ini sudah diluar standar sehingga perlu dilakukan load shedding untuk mengembalikan sistem kedalam keadaan yang stabil dan sesuai dengan standar.





**Gambar 4.12** Respons Tegangan Pada Kasus G11 dan G18 Lepas

Pada gambar 4.12 ini terlihat bahwa terdapat penurunan tegangan dan osilasi pada masing-masing bus dikarenakan oleh lepasnya generator G11 dan G18. Bus 10BBA mengalami kenaikan tertinggi saat terjadi gangguan yaitu 101.38% pada  $t=18.3$  detik dan penurunan hingga 83.35% dan setelah itu akan berosilasi yang cenderung naik. Sedangkan untuk Bus 00AHC20 mengalami penurunan tegangan paling besar hingga 79.63% dan setelah itu berosilasi ke 86.73% pada  $t=60$  sekon. Respons tegangan terus berosilasi sehingga dapat dikatakan terjadi ketidak stabilan pada sistem.

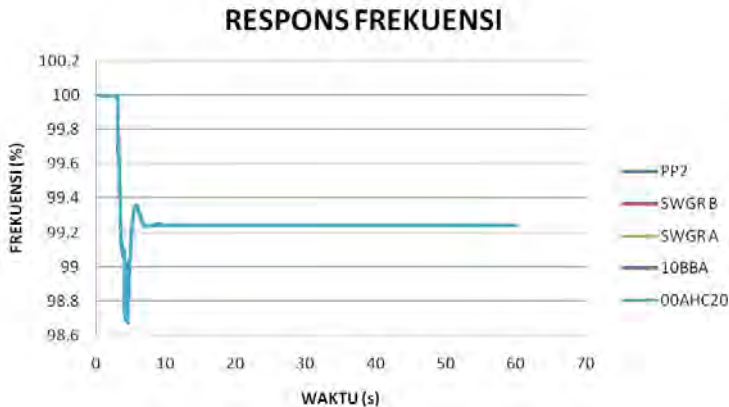


**Gambar 4.13** Respons Sudut Rotor Pada Kasus G11 dan G18 Lepas

Pada gambar 4.13 menunjukkan respons sudut rotor dari generator lainnya saat terjadi kasus lepasnya generator G11 dan G18 pada waktu masing-masing saat  $t=3.00$  detik dan  $t=4.00$  detik dan dengan menggunakan G16 sebagai refrensi generaor. Terlihat bahwa hanya terjadi kenaikan sementara pada sudut generator STG-1G dari 19.54 derajat hingga 25.64 derajat pada saat  $t=3.20$  detik kemudian turun hingga 17.03 derajat saat  $t=4.00$  detik namun setelah itu sudut rotor terus berosilasi cenderung naik hingga mencapai 24.42 derajat pada  $t=60$  detik sedangkan pada STG-2G yang memiliki nilai awal sebesar 20.28 dan naik hingga 26.41 derajat pada  $t=3.20$  detik namun kemudian berosilasi hingga 24.16 derajat pada  $t=60$  detik. Berdasarkan hasil simulasi kasus lepasnya generator G11 dan G18 di atas dapat disimpulkan bahwa pada kasus tersebut kondisi sistem dalam keadaan tidak stabil. Hal ini dapat diamati dari respons frekuensi yang terus menurun dan terjadinya osilasi pada respons tegangan dan sudut rotor tanpa menuju steady state.

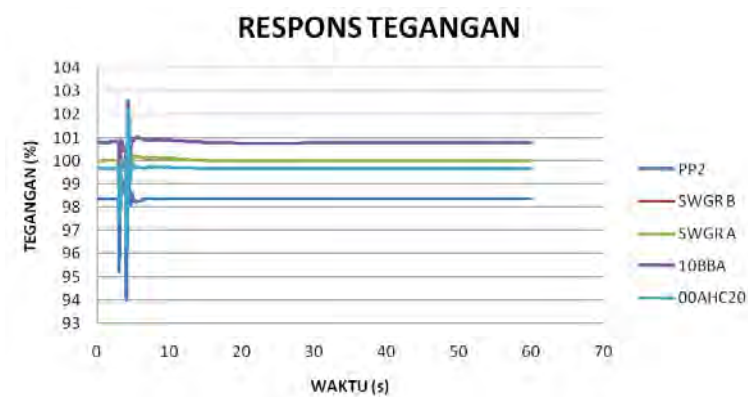
#### 4.3.3.1. Studi Kasus Generator G11 dan G18 Lepas dan Load Shedding

Pada sub-bab ini akan dijelaskan mengenai mekanisme pelepasan beban untuk memberikan solusi terhadap kasus lepasnya generator G11 dan G18. Pada kasus lepasnya G11 dan G18 terjadi penurunan frekuensi yang sangat drastis dan nilai tersebut sudah tidak dalam batas aman menurut standar frekuensi yang digunakan yaitu IEEE Std C37.106-2003 sehingga perlu dilakukan pelepasan beban atau *load shedding* sesuai dengan standar ANSI/IEEE C37.106-1987 yaitu load-shedding 3 tahap dengan menggunakan relay *underfrequency*. Pelepasan beban tahap 1 dilakukan saat frekuensi mencapai nilai 98.83% yaitu saat  $t = 4.061$  detik + delay 6 cycle (0.12 s) sehingga pelepasan beban tahap 1 dilakukan saat  $t = 4.181$  detik. Jumlah beban yang dilepas menurut standar adalah 10% dari beban total sehingga diperoleh 15.98 MW.



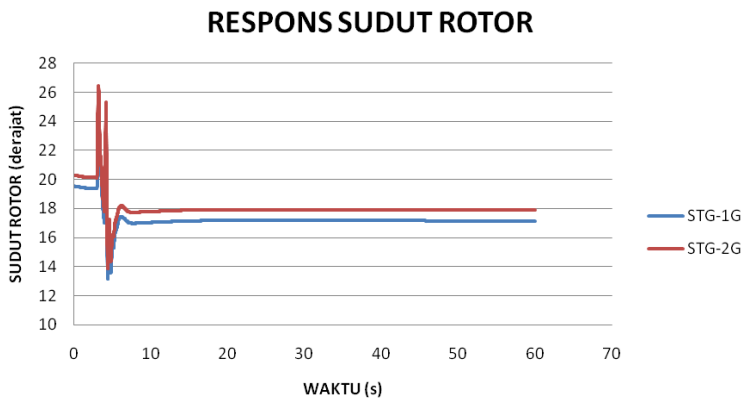
**Gambar 4.14** Respons Frekuensi Pada Kasus G11 dan G18 Lepas dan Load Shedding

Pada Gambar 4.14 menunjukkan bahwa sistem kembali stabil setelah dilakukan pelepasan beban sesaat setelah terjadi gangguan. Pada gambar tersebut terlihat bahwa terjadi penurunan frekuensi hingga 98.711% pada  $t = 4.181$  detik kemudian setelah dilakukan pelepasan beban frekuensi mulai kembali naik hingga 99.32% dan kemudian stabil pada 99.24%. Nilai ini telah sesuai dengan standar frekuensi yang digunakan.



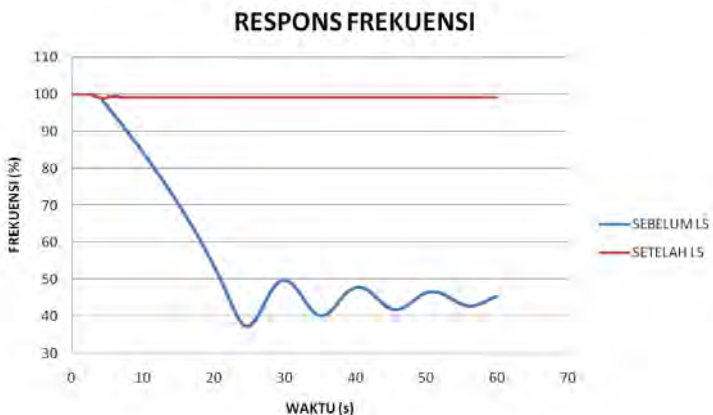
**Gambar 4.15** Respons Tegangan Pada Kasus G11 dan G18 Lepas dan Load Shedding

Gambar diatas menunjukkan bahwa tegangan pada sistem tidak lagi beresilasi seperti saat terjadi gangguan. Tegangan pada Bus 00AHC20 naik hingga 102.59% dan stabil pada 99.6% , Bus 10BBA naik hingga 102.56% dan stabil pada 100.7%, Bus SWGR B naik hingga 101.69% dan stabil pada 99.96% , Bus PP2 mengalami penurunan hingga 94.11% namun akhirnya stabil pada 98.37% dan Bus SWGR A stabil pada 99.96% sehingga semua bus masih tergolong aman dan sesuai dengan standar.



**Gambar 4.16** Respons Sudut Rotor Pada Kasus G11 dan G18 Lepas dan Load Shedding

Pada gambar 4.16 menunjukkan respons sudut rotor dari generator lainnya saat generator G11 dan G18 lepas masing-masing pada saat  $t=3.00$  detik  $t=4.00$  detik dan load shedding pada  $t=4.181$  detik. Terlihat bahwa hanya terjadi kenaikan sementara pada sudut generator STG-1G dari 19.54 derajat hingga 25.64 derajat pada  $t=3.20$  detik kemudian turun hingga mencapai nilai 17.04 derajat pada saat  $t=4.00$  detik namun setelah itu sudut rotor stabil pada 17.1 derajat sedangkan pada STG-2G yang memiliki nilai awal sebesar 20.28 dan naik hingga 26.41 derajat pada  $t=3.20$  detik namun stabil pada 17.85 derajat. Berdasarkan hasil simulasi kasus lepasnya generator G11 dan G18 dan *load shedding* di atas dapat disimpulkan bahwa respons frekuensi, tegangan dan sudut rotor pada kasus tersebut telah berada pada standar yang diperbolehkan.



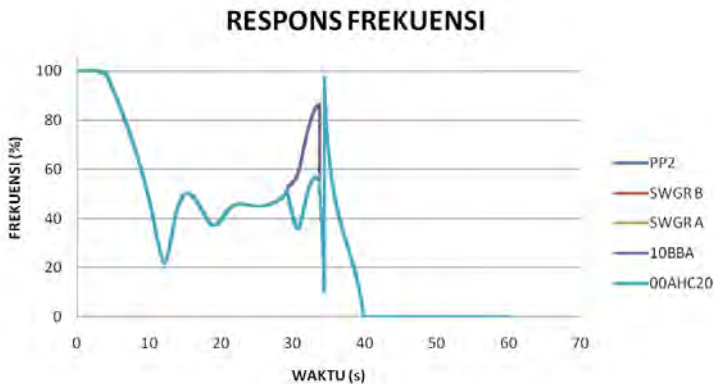
**Gambar 4.17** Perbandingan Frekuensi Pada Kasus G11 dan G18 Lepas

Gambar 4.17 menunjukkan perbandingan respons frekuensi pada saat sebelum dan sesudah dilakukan mekanisme load shedding tahap pertama. Terlihat pada saat sebelum dilakukan load shedding bahwa terjadi penurunan frekuensi setelah  $t= 4.00$  detik yaitu sesaat setelah lepasnya kedua generator tersebut. Frekuensi mengalami penurunan hingga 37.32% pada  $t= 24.91$  detik dan beresilasi hingga mencapai 45.43% pada  $t= 60$  detik. Mekanisme pelepasan beban tahap 1 dilakukan saat  $t= 4.061$  detik + delay 6 cycle (0.12 s) sehingga pelepasan beban tahap 1 dilakukan saat  $t=4.181$  detik. Jumlah beban yang dilepas

menurut standar adalah 10% dari beban total sehingga diperoleh 15.98 MW. Setelah dilakukan pelepasan beban terlihat bahwa frekuensi mengalami kenaikan dan stabil kembali pada 99.24% sehingga frekuensi telah sesuai dengan standar yang digunakan.

#### 4.3.4. Studi Kasus Generator G11 dan STG-2G Lepas

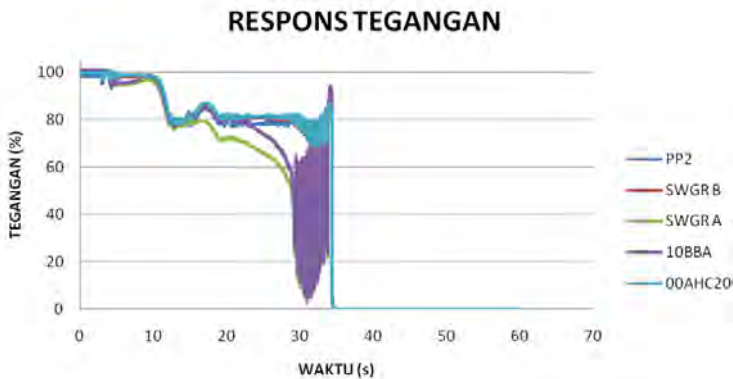
Pada studi kasus ini akan disimulasikan kasus lepasnya dua generator pada PT.ANTAM. Generator G11 dan STG-2G akan lepas secara bertahap masing-masing pada  $t = 3.00$  detik dan  $t = 4.00$  detik, kedua generator ini memiliki kapasitas masing-masing 18MW dan 32 MW. Pada kasus ini dua generator lepas dari sistem namun tujuh generator lain masih bekerja normal dan memiliki beban penuh dari operasi normal. Setelah mendapatkan respons dari simulasi pada saat gangguan dilakukan analisa apakah respons frekuensi, tegangan dan sudut rotor telah sesuai dengan standar. Apabila tidak maka akan dilakukan mekanisme load shedding. Berikut ini adalah gambar dari respons frekuensi, respons tegangan dan respons sudut rotor :



**Gambar 4.18** Respons Frekuensi Padat Kasus G11 dan STG-2G Lepas

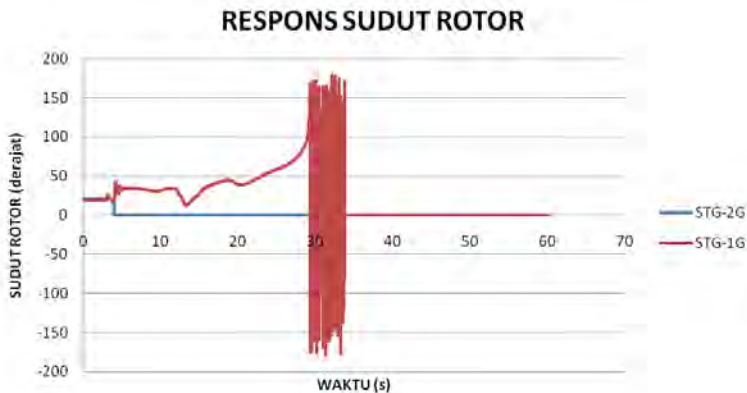
Gambar 4.18 menunjukkan bahwa mulai terjadi penurunan frekuensi setelah  $t = 4.00$  detik yaitu sesaat setelah lepasnya kedua generator tersebut. Frekuensi mengalami penurunan hingga 23.81% pada  $t = 11.81$  detik dan beresilasi hingga  $t = 29.1$  detik Bus 10BBA menjadi tidak sinkron dengan sistem dan bus 10BBA mengalami kenaikan

frekuensi hingga 82.68 pada  $t = 32.80$  detik kemudian kembali sinkron pada  $t = 32.96$ . Pada saat  $t = 34.381$  frekuensi sistem melonjak hingga mencapai 97.94% namun kemudian menurun hingga mencapai 0% pada  $t = 39.9$  detik. Hal ini menunjukkan bahwa pada sistem kelistrikan terjadi *blackout* atau mengalami mati total, hal ini dikarenakan sistem kelistrikan pada PT.ANTAM mengalami kekurangan daya pembangkitan yang sangat besar. Untuk mengatasi hal ini maka harus dilakukan pelepasan beban sebelum terjadi *blackout*.



**Gambar 4.19** Respons Tegangan Pada Kasus G11 dan STG-2G Lepas

Gambar 4.19 Menunjukkan bahwa terjadi penurunan tegangan pada bus SWGR A hingga mencapai nilai 76.23% pada  $t = 13.01$  kemudian tegangan pada sistem beresilasi dan bus SWGR A memiliki tegangan terendah saat beresilasi yaitu 10.48% pada  $t = 31.2$  detik. Semua bus mencapai nilai 0% pada  $t = 39.48$  detik. Pada situasi ini sistem telah mengalami *blackout* sehingga perlu dilakukan mekanisme *load shedding*.



**Gambar 4.20** Respons Sudut Rotor Pada Kasus G11 dan STG-2G Lepas

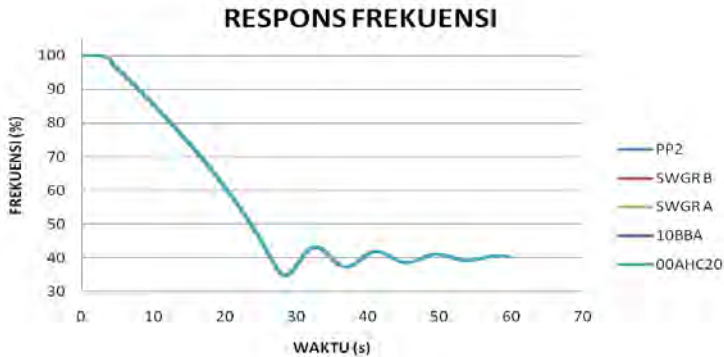
Pada gambar 4.20 menunjukkan respons sudut rotor dari generator lainnya saat generator G11 dan STG-2G lepas masing-masing pada saat  $t=3.00$  detik  $t=4.00$  detik. Terlihat pada grafik bahwa generator STG-1G terus mengalami osilasi hingga  $-171.59$  derajat ke  $171.61$  derajat sehingga dapat disimpulkan respons sudut rotor tidak sesuai dengan standar yaitu  $\pm 180$  derajat, hal ini menyebabkan generator terjadi lepas sinkron sehingga diperlukan mekanisme *load shedding*.

#### 4.3.4.1. Studi Kasus Generator G11 dan STG-2G Lepas dan Load Shedding

Pada sub-bab ini akan dijelaskan mengenai mekanisme pelepasan beban untuk memberikan solusi terhadap kasus lepasnya generator G11 dan STG-2g. Pada kasus lepasnya G11 dan STG-2G terjadi penurunan frekuensi dan tegangan yang sangat drastis hingga mencapai nilai 0% hal ini berarti sistem kelistrikan akan mengalami *blackout* sehingga diperlukan pelepasan beban sebelum terjadi hal tersebut. Pelepasan beban tahap 1 dilakukan saat frekuensi mencapai nilai 98.83% yaitu saat  $t=4.041$  detik + delay 6 cycle (0.12 s) sehingga pelepasan beban tahap 1 dilakukan saat  $t=4.161$  detik. Jumlah beban yang dilepas menurut standar adalah 10% dari beban total sehingga diperoleh 15.98 MW.

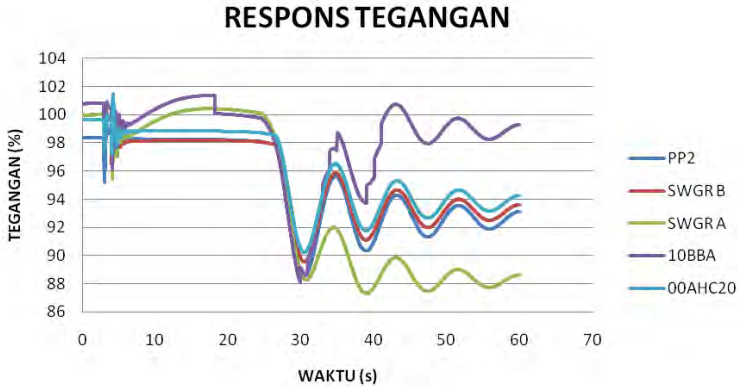


Apabila dengan adanya *load shedding* tahap 1 ini masih belum mencapai standar maka diperlukan *load shedding* tahap selanjutnya.



**Gambar 4.21** Respons Frekuensi Pada Kasus G11 dan STG-2G Lepas dan Load Shedding

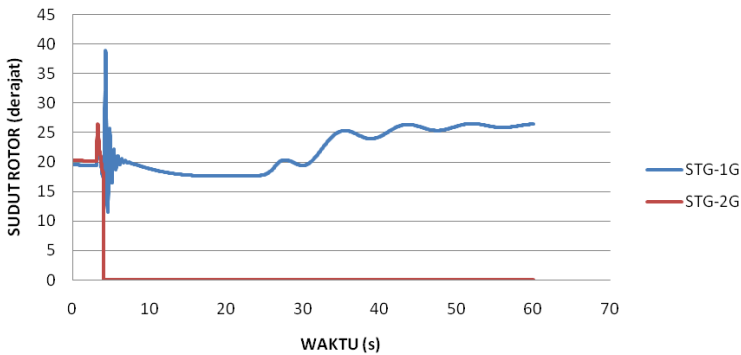
Pada gambar 4.21 menunjukkan respons frekuensi pada saat generator G11 dan STG-2G lepas pada  $t = 3.00$  detik dan  $t = 4.00$  detik dan juga pelepasan beban sebesar 15.98 MW yang dilakukan pada  $t = 4.16$  detik dengan waktu simulasi 60 detik. Dapat kita lihat bahwa respons frekuensi setelah dilakukan *load shedding* tahap 1 menjadi lebih baik dari sebelumnya. Pada respons sebelumnya sistem pasti akan mengalami *blackout* namun dengan adanya pelepasan beban sebesar 15.98 MW, sistem dapat menghindari terjadinya *blackout*. Namun terlihat pada gambar bahwa sistem masih mengalami penurunan frekuensi yang signifikan hingga mencapai nilai 27.16% pada  $t = 37.33$  detik dan terus berosilasi hingga mencapai frekuensi 40.12% pada  $t = 60$  detik. Sehingga dapat disimpulkan bahwa frekuensi ini masih belum sesuai dengan standar karena itu sistem memerlukan *load shedding* tahap 2.



**Gambar 4.22** Respons Tegangan Pada Kasus G11 dan STG-2G Lepas dan Load Shedding

Pada gambar 4.22 ini terlihat bahwa terdapat penurunan tegangan dan osilasi pada masing-masing bus dikarenakan oleh lepasnya generator G11 dan STG-2G . Bus 00AHC20 mengalami kenaikan tertinggi saat terjadi gangguan yaitu 101.38% pada  $t=4.2$  detik kemudian terjadi osilasi hingga mencapai 94.27% pada  $t=60$  detik, Bus 10BBA naik hingga 101.37% pada  $t=17.642$  detik dan mengalami osilasi cenderung naik hingga mencapai 99.29% pada saat  $t=60$  detik. Bus SWGR A mengalami penurunan hingga 88.26% saat  $t=30$  detik dan selanjutnya berosilasi cenderung menurun hingga 88.5% pada  $t=60$  detik.

## RESPONS SUDUT ROTOR

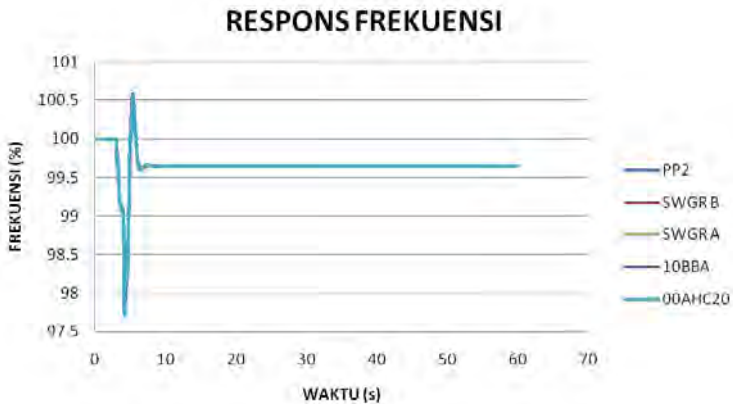


**Gambar 4.23** Respons Sudut Rotor Pada Kasus G11 dan STG-2G Lepas dan Load Shedding

Pada gambar 4.23 menunjukkan respons sudut rotor dari generator lainnya saat terjadi kasus lepasnya generator G11 dan STG-2G pada waktu masing-masing saat  $t=3.00$  detik dan  $t=4.00$  detik kemudian dilanjutkan dengan mekanisme *load shedding* tahap 1 pada  $t=4.161$  detik. Terlihat bahwa hanya terjadi kenaikan sementara pada sudut generator STG-1G dari 19.54 derajat hingga 38.93 derajat pada saat  $t=4.22$  detik kemudian turun hingga 11.47 derajat saat  $t=4.50$  detik namun setelah itu sudut rotor terus berosilasi cenderung naik hingga mencapai 26.43 derajat pada  $t=60$  detik sedangkan pada STG-2G yang memiliki nilai awal sebesar 20.28 dan turun hingga 0 derajat pada  $t=4.00$  detik hal ini dikarenakan generator STG-2G lepas dari sistem. Berdasarkan hasil simulasi kasus lepasnya generator G11 dan STG-2G di atas dapat disimpulkan bahwa pada kasus tersebut kondisi sistem masih dalam keadaan tidak stabil meskipun telah dilakukan *load shedding* tahap 1. Hal ini dapat diamati dari respons frekuensi yang masih terus menurun dan terjadinya osilasi pada respons tegangan dan sudut rotor tanpa menuju steady state. Sehingga dibutuhkan *load shedding* tahap ke 2 untuk mengembalikan sistem ke keadaan stabil.

#### 4.3.4.1. Studi Kasus Generator G11 dan STG-2G Lepas dan Load Shedding Tahap 2

Pada sub-bab ini akan dijelaskan mengenai mekanisme *load shedding* tahap 2. Karena melalui mekanisme *load shedding* tahap 1 frekuensi sistem belum bisa stabil. Maka dilanjutkan dengan mekanisme *load shedding* tahap 2. Pada sub bab ini akan dilakukan analisa hasil simulasi dari kasus generator G11 dan STG-2G lepas dilanjutkan dengan mekanisme *load shedding* tahap 2 sesuai dengan standar ANSI/IEEE C37.106-1987. *Load shedding* tahap 2 akan dilakukan pada saat frekuensi mencapai 98.16 %. Beban yang dilepas adalah 15% dari total keseluruhan beban sistem setelah dilakukan *load shedding* tahap 1. Sehingga didapatkan nilai sebesar 21.59 MW, *load shedding* tahap 2 dilakukan pada  $t=4.101 + 6 \text{ cycle}(0.12 \text{ s})$  yang berarti pada saat  $t=4.22$  detik. Berikut ini adalah gambar dari respons frekuensi, respons tegangan dan respons sudut rotor :

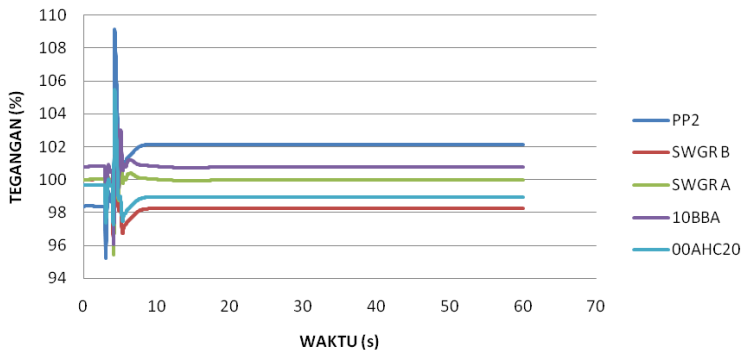


**Gambar 4.24** Respons Frekuensi Pada Kasus G11 dan STG-2G Lepas dan Load Shedding Tahap 2

Pada Gambar 4.24 menunjukkan bahwa sistem kembali stabil setelah dilakukan *load shedding* tahap 2 sesaat setelah dilakukan *load shedding* tahap 1. Dapat dilihat pada gambar 4.24 bahwa frekuensi

sistem mengalami penurunan hingga 97.71% pada  $t=4.16$  detik, pada titik ini terjadi *load shedding* tahap 1 yang dilanjutkan dengan *load shedding* tahap 2 pada  $t=4.22$  detik sehingga frekuensi mampu naik dan stabil kembali pada 99.6% . Pada kondisi ini frekuensi telah sesuai dengan standar yang digunakan sehingga tidak diperlukan *load shedding* lebih lanjut.

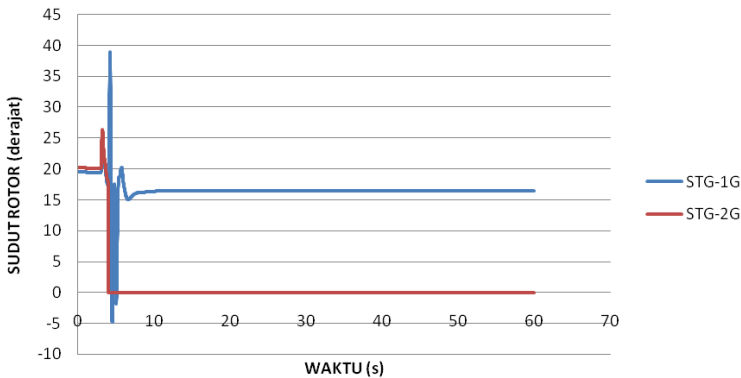
## RESPONS TEGANGAN



**Gambar 4.25** Respons Tegangan Pada Kasus G11 dan STG-2G Lepas dan Load Shedding Tahap 2

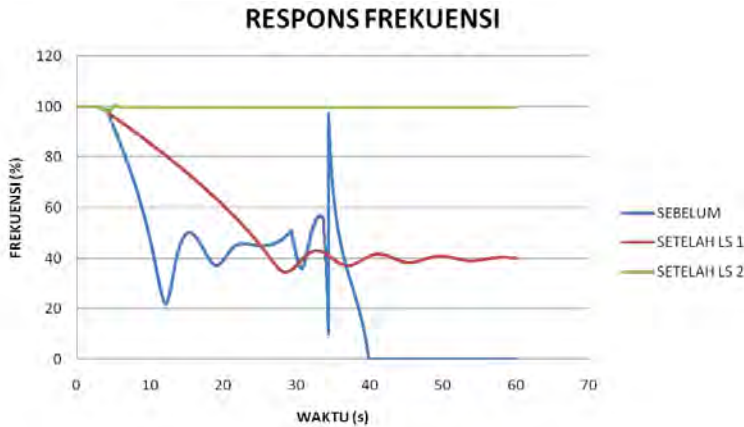
Gambar diatas menunjukkan bahwa tegangan pada sistem tidak lagi beresilasi seperti saat terjadi gangguan. Tegangan pada bus PP2 naik hingga 109.15% dan kembali stabil pada 102.15%. Tegangan pada bus SWGR A naik hingga 102.42% dan stabil pada 99.79%. Tegangan pada bus SWGR B naik hingga 103.91% dan stabil pada 98.23%. Tegangan pada bus 10BBA naik hingga 103.33% dan stabil pada 100.79%. Tegangan pada bus 00AHC20 naik hingga 105.5% dan stabil pada 98.93%. Sehingga respons tegangan setelah *load shedding* tahap 2 telah sesuai dengan standar yang digunakan.

## RESPONS SUDUT ROTOR



**Gambar 4.26** Respons Sudut Rotor Pada Kasus G11 dan STG-2G Lepas dan Load Shedding Tahap 2

Pada gambar 4.26 menunjukkan respons sudut rotor dari generator lainnya saat generator G11 dan STG-2G lepas masing-masing pada saat  $t=3.00$  detik  $t=4.00$  detik dan load shedding tahap 2 pada  $t=4.22$  detik. Terlihat bahwa hanya terjadi kenaikan sementara pada sudut generator STG-1G dari 19.54 derajat hingga 38.93 derajat pada  $t=4.22$  detik kemudian turun hingga mencapai nilai -4.8 derajat pada saat  $t=4.50$  detik namun setelah itu sudut rotor stabil pada 17.1 derajat sedangkan pada STG-2G yang memiliki nilai awal sebesar 20.28 dan naik hingga 26.41 derajat pada  $t=3.20$  detik namun setelah itu mencapai nilai 0 derajat karena STG-2G terlepas dari sistem. Berdasarkan hasil simulasi kasus lepasnya generator G11 dan STG-2G dan *load shedding* tahap 2 di atas dapat disimpulkan bahwa respons frekuensi, tegangan dan sudut rotor pada kasus tersebut telah berada pada standar yang diperbolehkan.



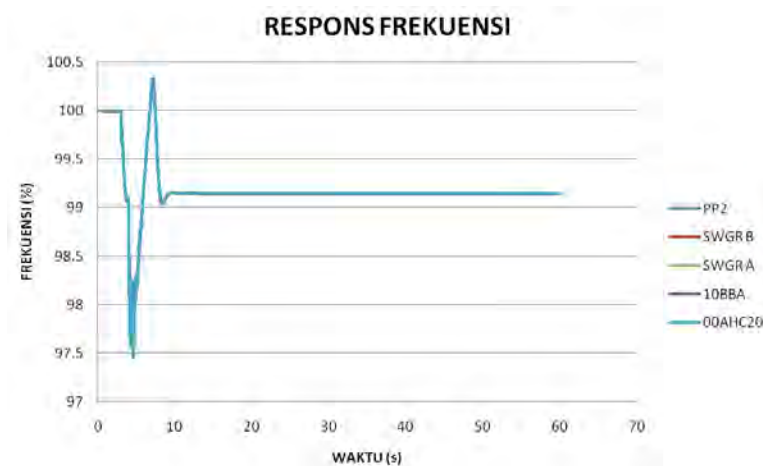
**Gambar 4.27** Perbandingan Frekuensi Pada Kasus G11 dan STG-2G Lepas

Gambar 4.27 menunjukkan perbandingan respons frekuensi pada saat sebelum dan sesudah dilakukan mekanisme load shedding tahap pertama dan kedua. Dapat dilihat pada gambar bahwa sebelum dilakukan *load shedding* maka sistem kelistrikan akan mengalami *blackout* pada saat  $t=39.9$  detik dikarenakan frekuensi sistem mencapai nilai 0%. Untuk mencegah hal tersebut dilakukan *load shedding* tahap 1 dengan melepas beban sebesar 15.98 MW atau 10% dari beban total pada saat  $t=4.16$  detik sehingga menghasilkan kurva berwarna merah pada gambar 4.26. Pada kurva ini sistem tidak lagi mengalami *blackout* namun frekuensi operasi masih terlalu rendah dan tidak sesuai standar sehingga diperlukan adanya *load shedding* tahap 2 dengan melepas beban sebesar 21.59 MW pada saat  $t=4.22$  detik. Dengan adanya *load shedding* tahap 2 menghasilkan kurva baru berwarna hijau pada gambar 4.27 dimana frekuensi pada sistem telah sesuai dengan standar yang digunakan.

#### 4.3.4.3 Studi Kasus Generator G11 dan STG-2G Lepas Load Shedding Status

Pada sub-bab ini akan dilakukan analisa hasil simulasi dari studi kasus generator G11 dan STG-2G lepas dilanjutkan dengan mekanisme *load shedding* status dengan menggunakan *lockout relay* (86).

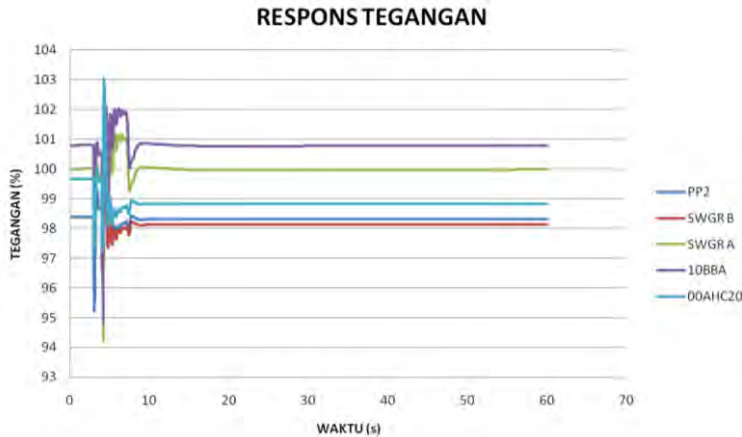
Mekanisme yang dilakukan adalah melepas beban sebesar 27.73 MW dari total beban pada  $t = 0.2$  detik setelah terjadi gangguan. Respon frekuensi, respon tegangan dan respon sudut rotor setelah dilakukan *load shedding* status dapat dilihat pada gambar berikut ini:



**Gambar 4.28** Respons Frekuensi Pada Kasus G11 dan STG-2G Lepas Load Shedding Status

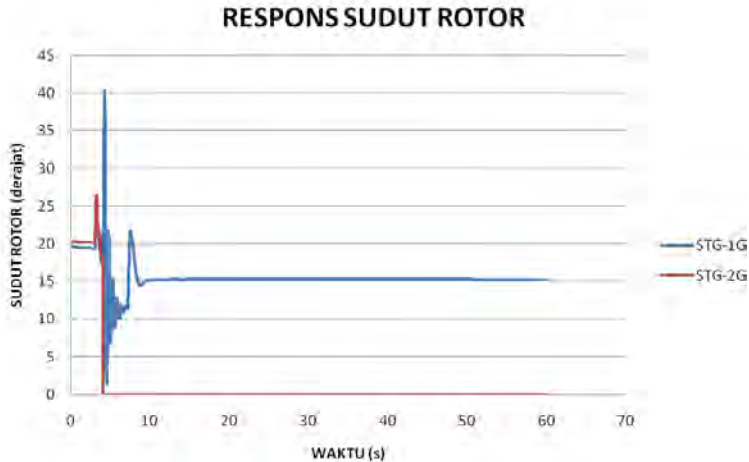
Pada Gambar 4.28 menunjukkan bahwa sistem kembali stabil setelah dilakukan *load shedding* status sesaat setelah terjadi gangguan. Dapat dilihat pada gambar 4.28 bahwa frekuensi sistem mengalami penurunan hingga 97.48% pada  $t=4.58$  detik dan kemudian mengalami peningkatan hingga 100.26% pada  $t=7.02$  detik namun kembali stabil pada 99.19%. Sehingga respons frekuensi telah sesuai dengan standar yang diperbolehkan.





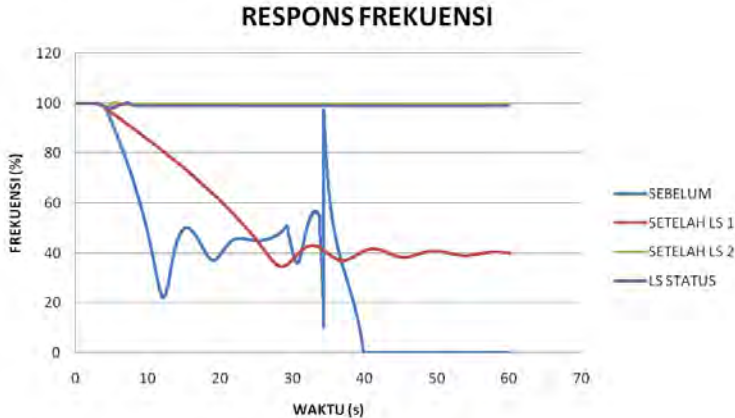
**Gambar 4.29** Respons Tegangan Pada Kasus G11 dan STG-2G Lepas Load Shedding Status

Pada Gambar 4.29 ini menunjukkan bahwa tegangan pada sistem tidak lagi beresilasi seperti saat terjadi gangguan. Tegangan pada bus PP2 naik hingga 103.05% dan kembali stabil pada 98.3%. Tegangan pada bus SWGR A naik hingga 101.29% dan stabil pada 99.8%. Tegangan pada bus SWGR B naik hingga 102.34% dan stabil pada 97.8%. Tegangan pada bus 10BBA naik hingga 102.14% dan stabil pada 100.86%. Tegangan pada bus 00AHC20 naik hingga 103.05% dan stabil pada 98.81%. Sehingga respons tegangan setelah *load shedding* status telah sesuai dengan standar yang diperbolehkan.



**Gambar 4.30** Respons Sudut Rotor Pada Kasus G11 dan STG-2G Lepas Load Shedding Status

Pada gambar 4.30 menunjukkan respons sudut rotor dari generator lainnya saat generator G11 dan STG-2G lepas masing-masing pada saat  $t=3.00$  detik  $t=4.00$  detik dan *load shedding* status pada  $t=4.20$  detik. Terlihat bahwa hanya terjadi kenaikan sementara pada sudut generator STG-1G dari 19.54 derajat hingga 40.42 derajat pada  $t=4.22$  detik kemudian turun hingga mencapai nilai 1.57 derajat pada saat  $t=4.50$  detik kemudian beresilasi namun setelah itu sudut rotor stabil pada 15.27 derajat sedangkan pada STG-2G yang memiliki nilai awal sebesar 20.28 dan naik hingga 26.41 derajat pada  $t=3.20$  detik namun kemudian mencapai nilai 0 derajat karena generator terlepas dari sistem. Berdasarkan hasil simulasi kasus lepasnya generator G11 dan STG-2G dan *load shedding* status dapat disimpulkan bahwa respons frekuensi, tegangan dan sudut rotor pada kasus tersebut telah berada pada standar yang diperbolehkan.



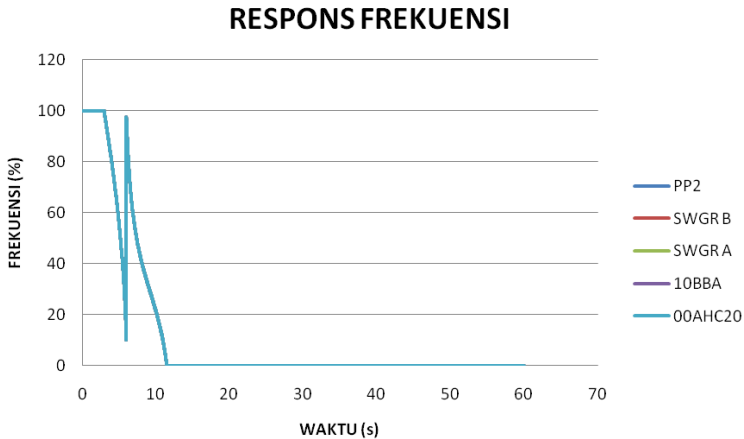
**Gambar 4.31** Perbandingan Frekuensi Pada Kasus G11 dan STG-2G Lepas

Pada Gambar 4.31 menunjukkan perbandingan antara mekanisme *load shedding* status dan *load shedding* frekuensi dengan 2 tahap. Apabila dibandingkan dengan *load shedding* frekuensi, sistem dengan *load shedding* status lebih cepat mencapai kondisi *steady state* selain itu jumlah beban yang dilepas pada *load shedding* status adalah sebesar 27.73 MW dari beban total sedangkan jumlah beban yang dilepas pada *load shedding* frekuensi adalah sebesar 37.57 MW dari beban total pada tahap pertama dan kedua sehingga lebih efisien. Kedua mekanisme *load shedding* dapat digunakan namun demikian disarankan untuk menggunakan *load shedding* status sebagai mekanisme pelepasan beban yang utama sedangkan *load shedding* frekuensi sebagai *back up* demi keandalan operasi sistem.

#### 4.3.5. Studi Kasus Generator STG-1G dan STG-2G Lepas

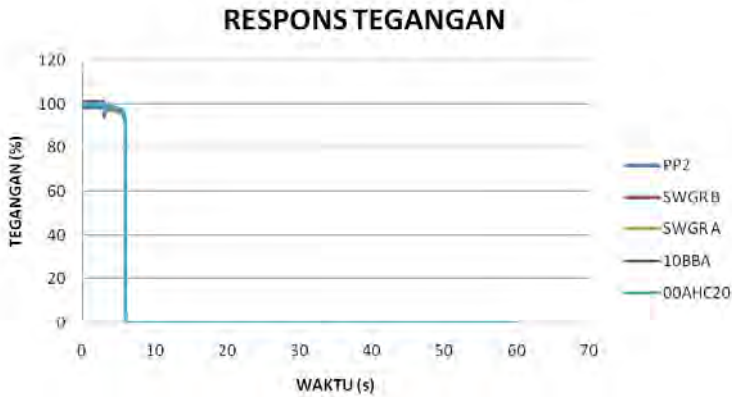
Pada studi kasus ini akan disimulasikan kasus lepasnya dua generator pada PT.ANTAM. Generator STG-1G dan STG-2G akan lepas secara bersamaan yaitu pada saat  $t = 3.00$  detik, kedua generator ini memiliki kapasitas yang sama yaitu 32MW. Pada kasus ini dua generator lepas dari sistem namun tujuh generator lain masih bekerja normal dan memiliki beban penuh dari operasi normal. Setelah mendapatkan respons dari simulasi pada saat gangguan dilakukan analisa apakah

respons frekuensi, tegangan dan sudut rotor telah sesuai dengan standar. Apabila tidak maka akan dilakukan mekanisme *load shedding*. Berikut ini adalah gambar dari respons frekuensi, respons tegangan dan respons sudut rotor :



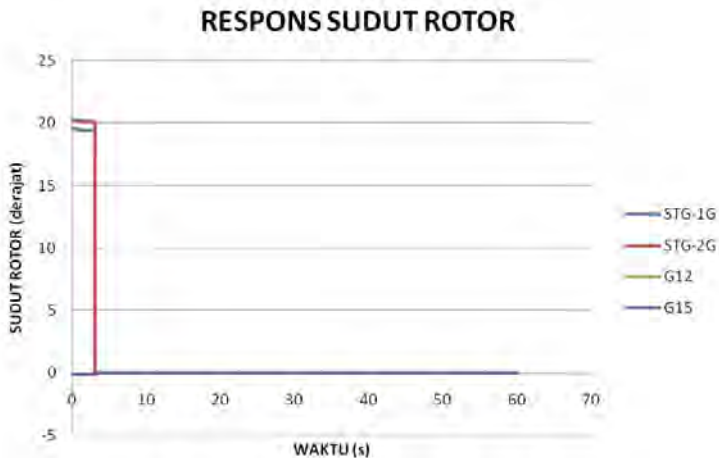
**Gambar 4.32** Respons Frekuensi Pada Kasus STG-1G dan STG-2G Lepas

Gambar 4.32 menunjukkan bahwa mulai terjadi penurunan frekuensi setelah  $t = 3.00$  detik yaitu sesaat setelah lepasnya kedua generator tersebut. Frekuensi mengalami penurunan yang sangat besar hingga menjadi 10.12% dari frekuensi normal pada saat  $t = 6.001$  detik namun kemudian pada saat  $t = 6.02$  detik frekuensi melonjak hingga mencapai nilai 97.56% setelah itu frekuensi mengalami penurunan hingga 0% pada  $t = 11.52$  detik yang menyebabkan *blackout* pada sistem kelistrikan di PT.ANTAM. Sehingga dibutuhkan mekanisme *load shedding* agar sistem menjadi stabil.



**Gambar 4.33** Respons Tegangan Pada Kasus STG-1G dan STG-2G Lepas

Gambar 4.33 Menunjukkan bahwa terjadi penurunan tegangan setelah terjadi gangguan yaitu sesaat setelah  $t=3.00$  detik. Pada gambar dapat dilihat bahwa tegangan masing-masing bus mengalami penurunan hingga 0% pada  $t=6.30$  detik pada titik ini sistem telah mengalami *blackout*. Sehingga diperlukan mekanisme *load shedding*.



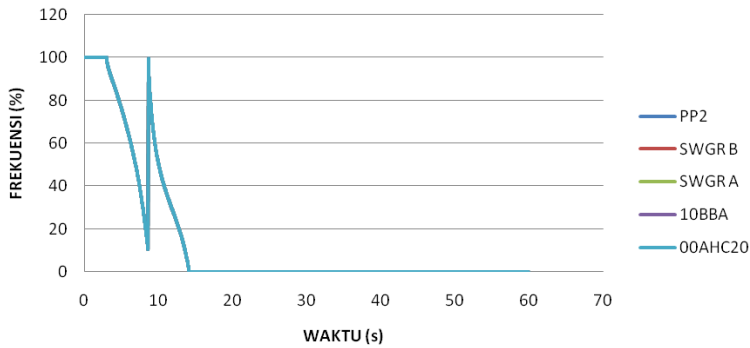
**Gambar 4.34** Respons Sudut Rotor Pada Kasus STG-1G dan STG-2G Lepas

Pada gambar 4.34 menunjukkan respons sudut rotor dari generator lainnya saat generator STG-1G dan STG-2G lepas secara bersamaan pada saat  $t=3.00$  detik. Terlihat pada grafik bahwa generator STG-1G dan STG-2G mengalami penurunan hingga nilai 0 derajat yang disebabkan oleh lepasnya kedua generator tersebut dari sistem sedangkan untuk generator G12 dan G15 mengalami peningkatan sementara hingga 0.04 derajat pada  $t=3.24$  detik dan setelah itu menurun hingga 0 derajat karena terjadi sistem *blackout*. Sehingga untuk kasus ini sangat diperlukan mekanisme *load shedding* agar sistem kembali stabil.

#### **4.3.5.1. Studi Kasus Generator STG-1G dan STG-2G Lepas dan Load Shedding**

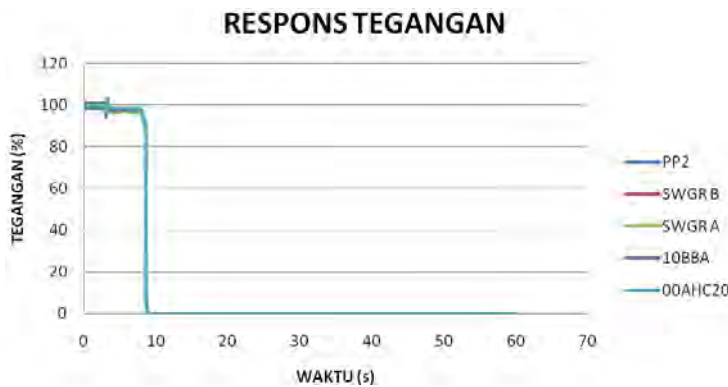
Pada sub-bab ini akan dijelaskan mengenai mekanisme pelepasan beban untuk memberikan solusi terhadap kasus lepasnya generator STG-1G dan STG-2G. Pada kasus lepasnya STG-1G dan STG-2G terjadi penurunan frekuensi dan tegangan yang sangat drastis hingga mencapai nilai 0% hal ini berarti sistem kelistrikan akan mengalami *blackout* sehingga diperlukan pelepasan beban sebelum terjadi hal tersebut. Pelepasan beban tahap 1 dilakukan saat frekuensi mencapai nilai 98.83% yaitu saat  $t= 3.061$  detik + delay 6 *cycle* (0.12 s) sehingga pelepasan beban tahap 1 dilakukan saat  $t=3.181$  detik. Jumlah beban yang dilepas menurut standar adalah 10% dari beban total sehingga diperoleh 15.98 MW. Apabila dengan adanya *load shedding* tahap 1 ini masih belum mencapai standar maka diperlukan *load shedding* tahap selanjutnya.

## RESPONS FREKUENSI



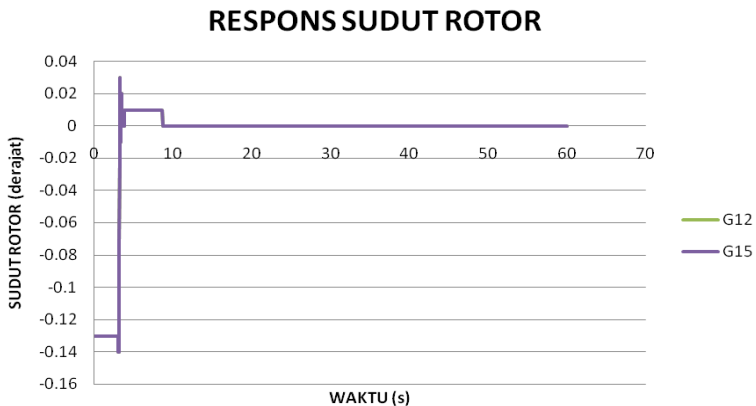
**Gambar 4.35** Respons Frekuensi Pada Kasus STG-1G dan STG-2G Lepas dan Load Shedding

Gambar 4.35 menunjukkan bahwa mekanisme *load shedding* tahap 1 masih belum mencukupi untuk membuat sistem mencapai kestabilan frekuensi sesuai standar. Frekuensi mengalami penurunan yang sangat besar hingga menjadi 10.45% dari frekuensi normal pada saat  $t=8.64$  detik namun kemudian pada saat  $t=8.66$  detik frekuensi melonjak hingga mencapai nilai 99.56% setelah itu frekuensi mengalami penurunan hingga 0% pada  $t=14.18$  detik yang menyebabkan *blackout* pada sistem kelistrikan di PT.ANTAM. Sehingga dibutuhkan mekanisme *load shedding* tahap selanjutnya agar sistem menjadi lebih stabil.



**Gambar 4.36** Respons Tegangan Pada Kasus STG-1G dan STG-2G Lepas dan Load Shedding

Gambar 4.36 Menunjukkan bahwa terjadi penurunan tegangan setelah terjadi gangguan yaitu sesaat setelah  $t=3.00$  detik. Pada gambar dapat dilihat bahwa tegangan masing-masing bus mengalami penurunan hingga 0% pada  $t=8.94$  detik pada titik ini sistem telah mengalami *blackout*. Sehingga diperlukan mekanisme *load shedding* tahap selanjutnya agar sistem menjadi lebih stabil.



**Gambar 4.37** Respons Sudut Rotor Pada Kasus STG-1G dan STG-2G Lepas dan Load Shedding

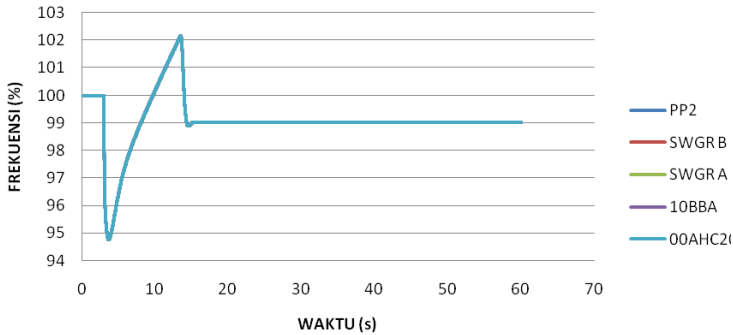


Pada gambar 4.37 menunjukkan respons sudut rotor dari generator lainnya saat generator STG-1G dan STG-2G lepas secara bersamaan pada saat  $t=3.00$  detik. Terlihat pada grafik sub-bab sebelumnya bahwa generator STG-1G dan STG-2G mengalami penurunan hingga nilai 0 derajat yang disebabkan oleh lepasnya kedua generator tersebut dari sistem sehingga dalam sub-bab ini tidak dilakukan *plot* untuk kedua generator tersebut agar mampu melihat grafik yang lebih detail dari generator G12 dan G15. Pada generator G12 dan G15 mengalami peningkatan sementara hingga 0.03 derajat pada  $t=3.22$  detik dan setelah itu menurun hingga 0 derajat karena terjadi sistem *blackout*. Sehingga untuk kasus ini sangat diperlukan mekanisme *load shedding* tahap 2 agar sistem kembali stabil.

#### **4.3.5.2. Studi Kasus Generator STG-1G dan STG-2G Lepas dan Load Shedding tahap 2**

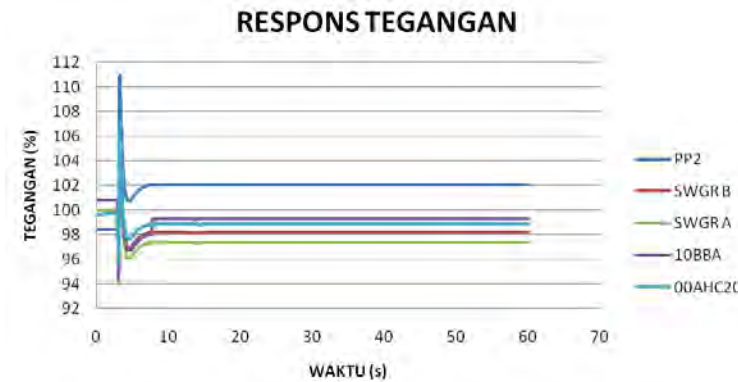
Pada sub-bab ini akan dijelaskan mengenai mekanisme *load shedding* tahap 2. Karena melalui mekanisme *load shedding* tahap 1 masih terjadi sistem *blackout*. Maka dilanjutkan dengan mekanisme *load shedding* tahap 2. Pada sub bab ini akan dilakukan analisa hasil simulasi dari kasus generator STG-1G dan STG-2G lepas dilanjutkan dengan mekanisme *load shedding* tahap 2 sesuai dengan standar ANSI/IEEE C37.106-1987. *Load shedding* tahap 2 akan dilakukan pada saat frekuensi mencapai 98.16 %. Beban yang dilepas adalah 15% dari total keseluruhan beban sistem setelah dilakukan *load shedding* tahap 1. Sehingga didapatkan nilai sebesar 21.59 MW, *load shedding* tahap 2 dilakukan pada  $t=3.071 + 6 \text{ cycle}(0.12 \text{ s})$  yang berarti pada saat  $t=3.191$  detik.

## RESPONS FREKUENSI



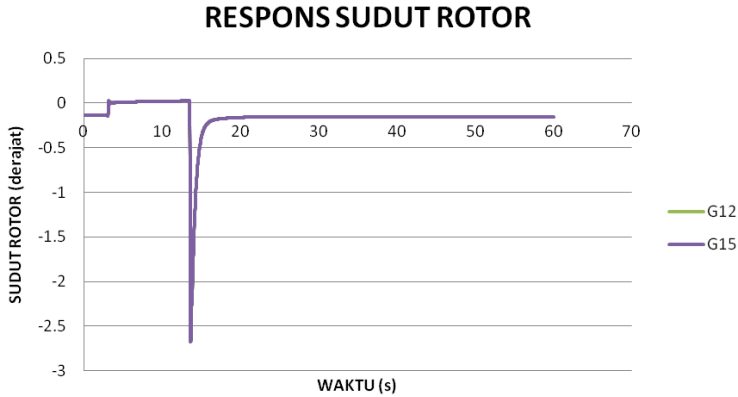
**Gambar 4.38** Respons Frekuensi Pada Kasus STG-1G dan STG-2G Lepas dan Load Shedding Tahap 2

Pada Gambar 4.38 dapat dilihat bahwa setelah dilakukan mekanisme *load shedding* tahap 2 maka frekuensi sistem menjadi stabil. Pada gambar terdapat penurunan frekuensi sementara hingga 94.89% pada  $t=3.47$  detik dan mulai melonjak hingga 102.01% pada  $t=13.31$  detik dan kembali stabil pada 99.02% pada  $t=15.23$  detik. Pada kondisi ini frekuensi *steady state* belum sesuai dengan normal operasi yaitu 99.18%. Dalam operasi kontinyu sistem kelistrikan pada PT. Aneka Tambang pada kasus STG-1G dan STG-2G dengan *load shedding* tahap 2 mengalami *overload* pada generator dan terjadi *undervoltage* pada bus generator. Sehingga lebih baik dilakukan *load shedding* tahap 3.



**Gambar 4.39** Respons Tegangan Pada Kasus STG-1G dan STG-2G epas dan Load Shedding Tahap 2

Gambar 4.39 ini menunjukkan bahwa tegangan pada sistem tidak lagi mencapai nilai 0% seperti pada saat *load shedding* tahap 1. Tegangan pada bus PP2 naik hingga 110.95% dan kembali stabil pada 102.07%. Tegangan pada bus SWGR A naik hingga 105.66% dan stabil pada 97.33%. Tegangan pada bus SWGR B naik hingga 106.43% dan stabil pada 98.16%. Tegangan pada bus 10BBA naik hingga 106.56% dan stabil pada 99.30%. Tegangan pada bus 00AHC20 naik hingga 107.16% dan stabil pada 98.86%. Sehingga respons tegangan setelah *load shedding* tahap 2 telah sesuai dengan standar yang digunakan.



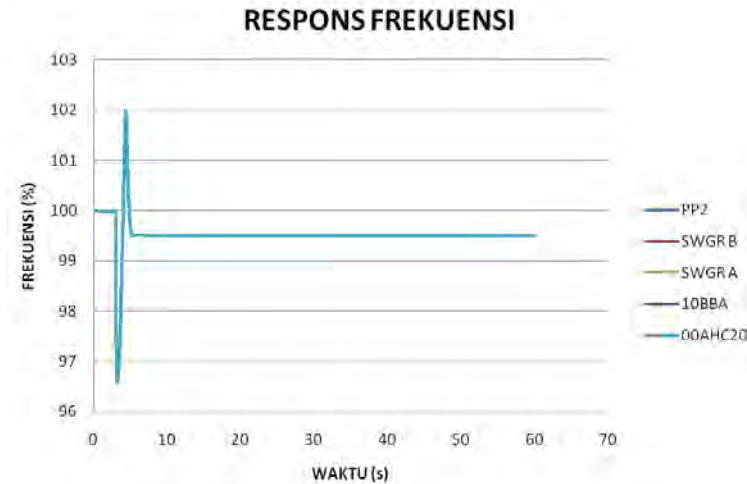
**Gambar 4.40** Respons Sudut Rotor Pada Kasus STG-1G dan STG-2G Lepas dan Load Shedding Tahap 2

Pada gambar 4.40 menunjukkan respons sudut rotor dari generator lainnya saat generator STG-1G dan STG-2G lepas secara bersamaan pada saat  $t=3.00$  detik. Terlihat pada grafik sub-bab sebelumnya bahwa generator STG-1G dan STG-2G mengalami penurunan hingga nilai 0 derajat yang disebabkan oleh lepasnya kedua generator tersebut dari sistem sehingga dalam sub-bab ini tidak dilakukan *plot* untuk kedua generator tersebut agar mampu melihat grafik yang lebih detail dari generator G12 dan G15. Pada generator G12 dan G15 mengalami penurunan hingga -2.68 derajat pada  $t=13.67$  detik dan kembali naik dan stabil pada nilai -0.16 derajat. Pada kasus ini sistem sudah tidak terjadi *blackout* dan tegangan dan sudut rotor telah sesuai dengan standar yang diperbolehkan namun respons frekuensi masih belum sesuai dengan normal operasi sehingga diperlukan *load shedding* tahap 3.

#### 4.3.5.3. Studi Kasus Generator STG-1G dan STG-2G Lepas dan Load Shedding tahap 3

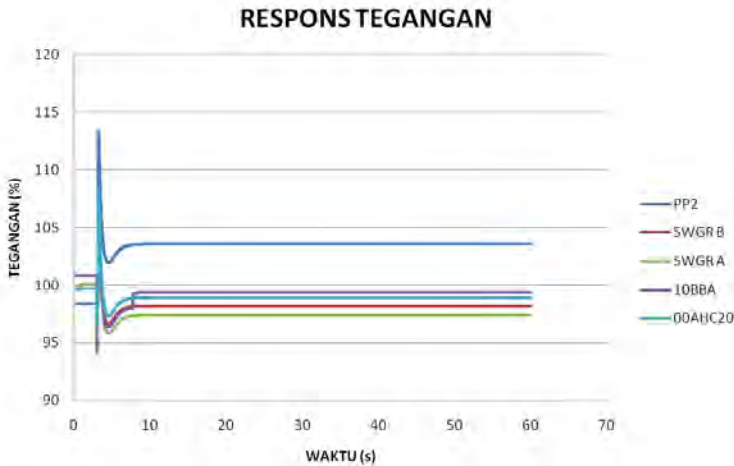
Pada sub-bab ini akan dijelaskan mengenai mekanisme *load shedding* tahap 3. Karena melalui mekanisme *load shedding* tahap 2 masih belum mencapai standar yang sesuai dengan normal operasi. Maka dilanjutkan dengan mekanisme *load shedding* tahap 3. *Load shedding* tahap 3 akan dilakukan pada frekuensi 97.5% sebelum

frekuensi mencapai 97%. Beban yang dilepas secukup mungkin dari total keseluruhan beban sistem sebelum mencapai frekuensi 97%. Jumlah beban yang dilepas pada *load shedding* tahap 3 adalah 10.87 MW. *Load shedding* tahap 3 dilakukan pada  $t=3.10 + 6 \text{ cycle}(0.12 \text{ s})$  yang berarti pada saat  $t=3.22$  detik yaitu sesegera mungkin setelah dilakukan *load shedding* tahap 2.



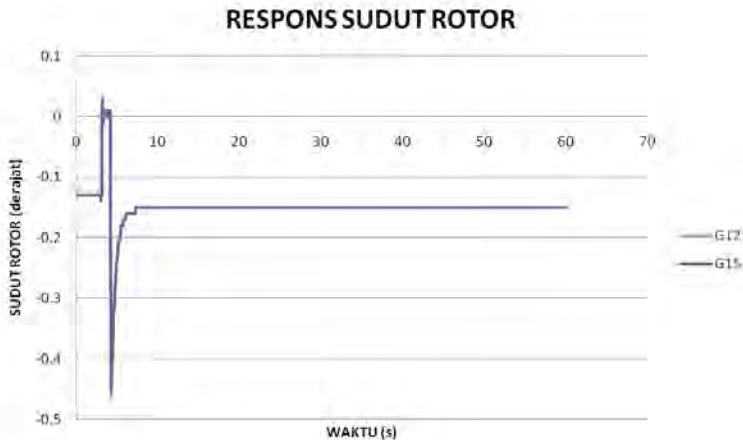
**Gambar 4.41** Respons Frekuensi Pada Kasus STG-1G dan STG-2G Lepas dan Load Shedding Tahap 3

Gambar 4.41 menunjukkan respon frekuensi bus setelah dilakukan load shedding tahap 3. Load shedding tahap 3 dilakukan saat frekuensi sistem mencapai 97.5 % yaitu pada saat  $t = 3.10$  detik + delay 6 cycle (0.12 detik) sehingga load shedding tahap 3 dilakukan pada saat  $t = 3.22$  detik dengan pelepasan beban sebesar total 48.44 MW (*load shedding* tahap 1 =15.98 MW, *load shedding* tahap 2 =21.59 MW, *load shedding* tahap 3=10.87 MW). Dari gambar dapat dilihat bahwa frekuensi kembali stabil pada 99.51 % sehingga setelah *load shedding* 3 respons frekuensi telah sesuai dengan standar yang diperbolehkan.



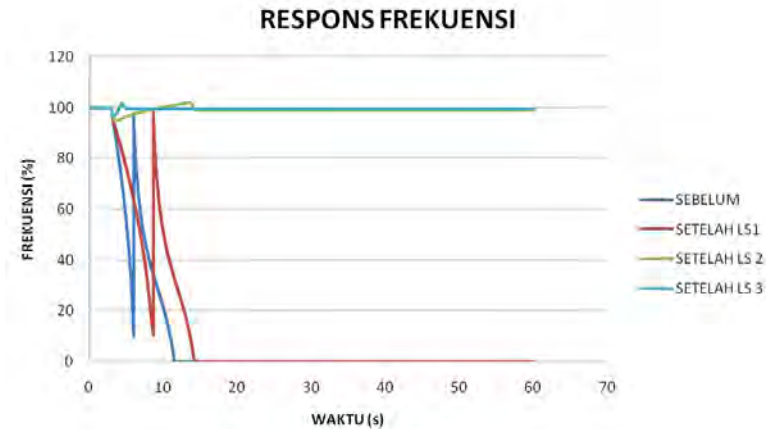
**Gambar 4.42** Respons Tegangan Pada Kasus STG-1G dan STG-2G Lepas dan Load Shedding Tahap 3

Gambar 4.42 ini menunjukkan bahwa tegangan pada sistem tidak lagi mencapai nilai 0% seperti pada saat *load shedding* tahap 1. Tegangan pada bus PP2 naik hingga 113.42% dan kembali stabil pada 103.05%. Tegangan pada bus SWGR A naik hingga 107.56% dan stabil pada 97.33%. Tegangan pada bus SWGR B naik hingga 106.43% dan stabil pada 97.37%. Tegangan pada bus 10BBA naik hingga 107.84% dan stabil pada 99.34%. Tegangan pada bus 00AHC20 naik hingga 108.29% dan stabil pada 98.9%. Sehingga respons tegangan setelah *load shedding* tahap 3 telah sesuai dengan standar yang digunakan.



**Gambar 4.43** Respons Sudut Rotor Pada Kasus STG-1G dan STG-2G Lepas dan Load Shedding Tahap 3

Pada gambar 4.43 menunjukkan respons sudut rotor dari generator lainnya saat generator STG-1G dan STG-2G lepas secara bersamaan pada saat  $t=3.00$  detik. Terlihat pada grafik sub-bab sebelumnya bahwa generator STG-1G dan STG-2G mengalami penurunan hingga nilai 0 derajat yang disebabkan oleh lepasnya kedua generator tersebut dari sistem sehingga dalam sub-bab ini tidak dilakukan *plot* untuk kedua generator tersebut agar mampu melihat grafik yang lebih detail dari generator G12 dan G15. Pada generator G12 dan G15 mengalami peningkatan hingga 0.03 derajat pada  $t=3.22$  detik kemudian menurun hingga -0.46 pada  $t=4.30$  detik namun kemudian stabil pada nilai -0.15 derajat. Sehingga respons sudut rotor saat dilakukan *load shedding* tahap 3 masih sesuai dengan standar yang diperbolehkan.



**Gambar 4.44** Perbandingan Frekuensi Pada Kasus STG-1G dan STG-2G Lepas dan Load Shedding tahap 3

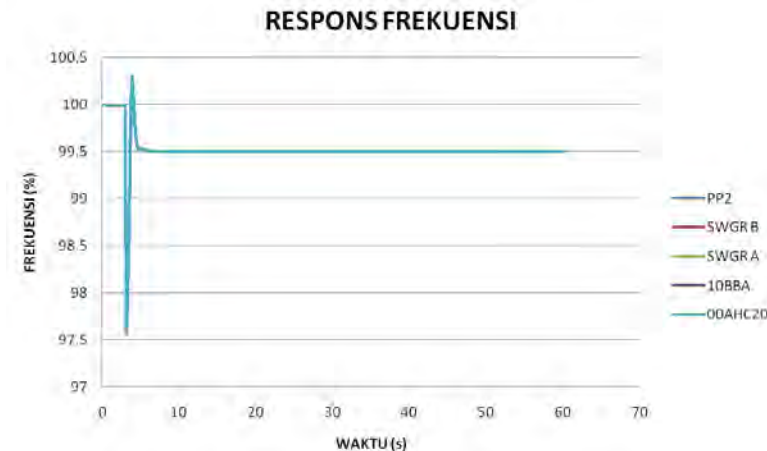
Gambar 4.44 menunjukkan perbandingan respons frekuensi pada saat sebelum dan sesudah dilakukan mekanisme load shedding tahap pertama dan kedua serta ketiga. Dapat dilihat pada garis berwarna biru menggambarkan kurva sebelum dilakukan *load shedding* sehingga frekuensi mengalami penurunan yang sangat besar hingga menjadi 10.12% dari frekuensi normal pada saat  $t=6.001$  detik namun kemudian pada saat  $t=6.02$  detik frekuensi melonjak hingga mencapai nilai 97.56% setelah itu frekuensi mengalami penurunan hingga 0% pada  $t=11.52$  detik yang menyebabkan sistem *blackout*. Kurva berwarna merah menunjukkan respons frekuensi setelah dilakukan *load shedding* namun dapat kita lihat bahwa mekanisme *load shedding* tahap 1 masih belum mencukupi untuk membuat sistem mencapai kestabilan frekuensi sesuai standar dan masih menyebabkan sistem *blackout*. Kurva berwarna hijau menunjukkan bahwa setelah dilakukan mekanisme *load shedding* tahap 2 maka frekuensi sistem menjadi stabil. Pada gambar terdapat penurunan frekuensi sementara hingga 94.89% pada  $t=3.47$  detik dan mulai melonjak hingga 102.01% pada  $t=13.31$  detik dan kembali stabil pada 99.02% pada  $t=15.23$  detik. Pada kondisi ini frekuensi *steady state* belum sesuai dengan normal operasi yaitu 99.18% selain itu karena



dalam operasi kontinyu sistem akan mengalami *overload* pada generator dan terjadi *undervoltage* pada bus karena kurangnya suplai daya sehingga perlu dilakukan *load shedding* tahap 3. Kurva berwarna biru muda merupakan respons frekuensi setelah dilakukan *load shedding* tahap 3, dengan adanya *load shedding* tahap 3 maka frekuensi stabil meningkat menjadi 99.51% sehingga respons frekuensi telah sesuai dengan standar yang diperbolehkan.

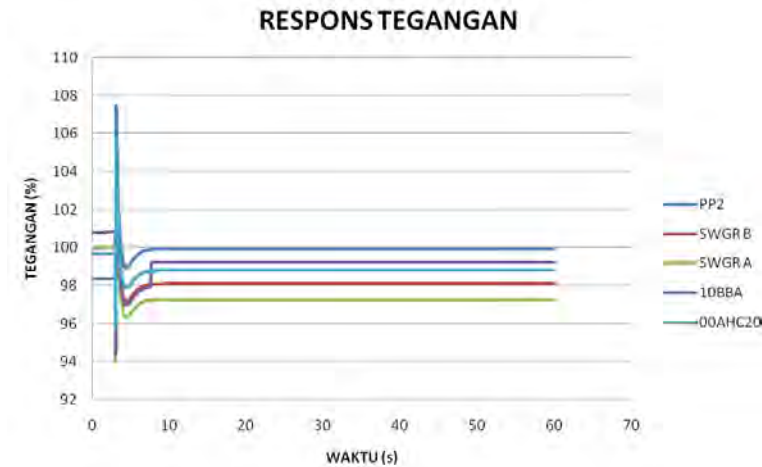
#### 4.3.5.4. Studi Kasus Generator STG-1G dan STG-2G Lepas Load Shedding Status

Pada sub bab ini akan dilakukan analisa hasil simulasi dari studi kasus generator STG-1G dan STG-2G lepas dilanjutkan dengan mekanisme *load shedding* status dengan menggunakan *lockout relay* (86). Mekanisme yang dilakukan adalah melepas beban sebesar 47.35MW dari total beban pada  $t = 0.2$  detik setelah terjadi gangguan. Respon frekuensi, respon tegangan dan respon sudut rotor setelah dilakukan *load shedding* status dapat dilihat pada gambar berikut ini:



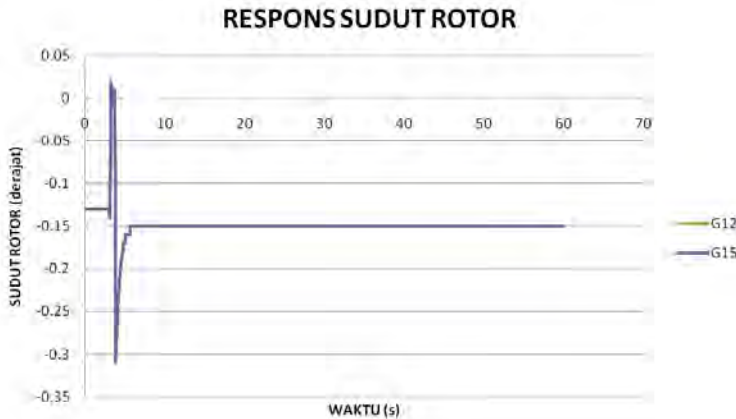
**Gambar 4.45** Respons Frekuensi Pada Kasus STG-1G dan STG-2G Lepas dan Load Shedding Status

Pada Gambar 4.45 dapat dilihat bahwa setelah dilakukan mekanisme *load shedding* status maka frekuensi sistem menjadi stabil. Pada gambar terdapat penurunan frekuensi sementara hingga 97.57% pada  $t=3.1$  detik dan mulai melonjak hingga 100.21% pada  $t=3.84$  detik dan kembali stabil pada 99.50%. Sehingga respons frekuensi telah sesuai dengan standar yang diperbolehkan.



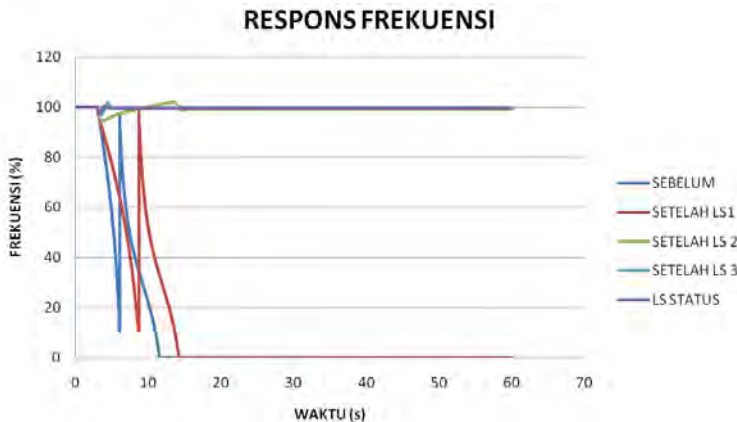
**Gambar 4.46** Respons Tegangan Pada Kasus STG-1G dan STG-2G Lepas dan Load Shedding Status

Pada Gambar 4.46 ini menunjukkan bahwa tegangan pada sistem telah kembali stabil setelah dilakukan *load shedding* status. Tegangan pada bus PP2 naik hingga 107.47% dan kembali stabil pada 99.93%. Tegangan pada bus SWGR A naik hingga 104.26% dan stabil pada 97.26%. Tegangan pada bus SWGR B naik hingga 105.03% dan stabil pada 98.1%. Tegangan pada bus 10BBA naik hingga 105.19% dan stabil pada 99.23%. Tegangan pada bus 00AHC20 naik hingga 105.74% dan stabil pada 98.8%. Sehingga respons tegangan setelah *load shedding* status telah sesuai dengan standar yang diperbolehkan.



**Gambar 4.47** Respons Sudut Rotor Pada Kasus STG-1G dan STG-2G Lepas dan Load Shedding Status

Pada gambar 4.47 menunjukkan respons sudut rotor dari generator lainnya saat generator STG-1G dan STG-2G lepas secara bersamaan pada saat  $t=3.00$  detik. Terlihat pada grafik sub-bab sebelumnya bahwa generator STG-1G dan STG-2G mengalami penurunan hingga nilai 0 derajat yang disebabkan oleh lepasnya kedua generator tersebut dari sistem sehingga dalam sub-bab ini tidak dilakukan *plot* untuk kedua generator tersebut agar mampu melihat grafik yang lebih detail dari generator G12 dan G15. Pada generator G12 dan G15 mengalami peningkatan hingga 0.03 derajat pada  $t=3.22$  detik kemudian menurun hingga -0.31 pada  $t=3.80$  detik namun kemudian stabil pada nilai -0.15 derajat. Sehingga respons sudut rotor setelah dilakukan *load shedding* status masih sesuai dengan standar yang diperbolehkan.



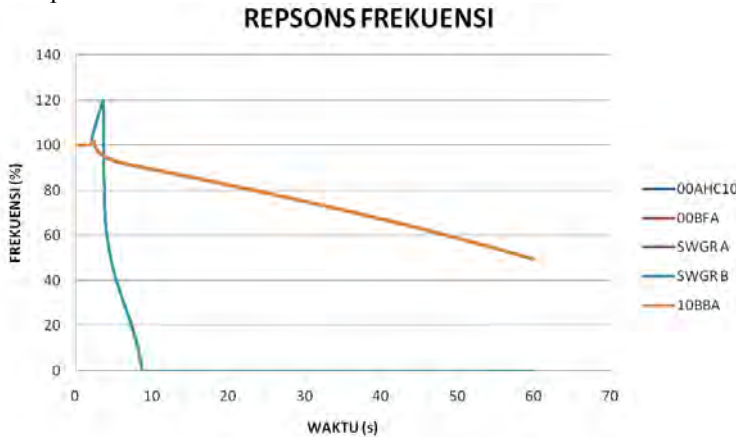
**Gambar 4.48** Perbandingan Frekuensi Pada Kasus STG-1G dan STG-2G Lepas

Pada Gambar 4.48 menunjukkan perbandingan antara mekanisme *load shedding* status dan *load shedding* frekuensi dengan 3 tahap. Apabila dibandingkan dengan *load shedding* frekuensi, sistem dengan *load shedding* status lebih cepat mencapai kondisi *steady state* selain itu jumlah beban yang dilepas pada *load shedding* status adalah sebesar 47.35 MW dari beban total sedangkan jumlah beban yang dilepas pada *load shedding* frekuensi adalah sebesar 48.44 MW dari beban total pada tahap pertama dan kedua sehingga lebih efisien. Kedua mekanisme *load shedding* dapat digunakan namun demikian disarankan untuk menggunakan *load shedding* status sebagai mekanisme pelepasan beban yang utama sedangkan *load shedding* frekuensi sebagai *back up* demi keamanan operasi sistem.

#### 4.3.6. Studi Kasus Short Circuit Pada Bus 00AHC20 (30KV)

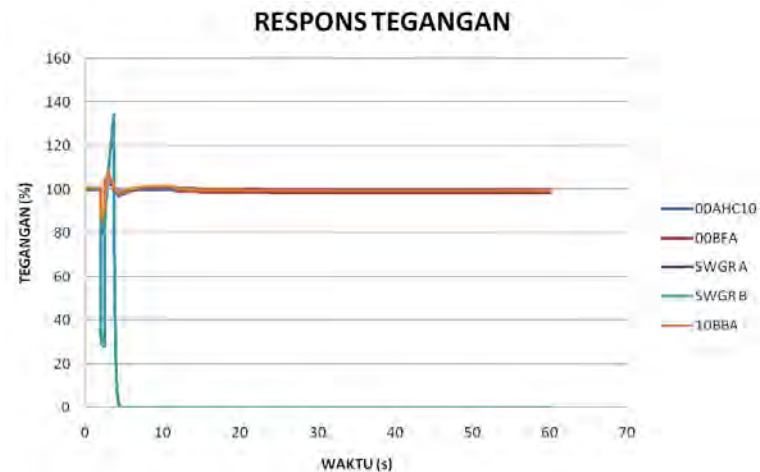
Pada sub bab ini akan disimulasikan gangguan hubung singkat (*short circuit*) tiga fasa pada level tegangan 30kV. Bus 00AHC20 disimulasikan terjadi hubung singkat pada  $t = 2.00$  detik. *Setting relay* CB 00AHC20GS dan CB 20BAT10GT yang melindungi bus 00AHC20 adalah 0.3 detik. Namun pada simulasi *relay* akan *open* pada saat  $t = 0.5$  detik (0.3 detik *setting relay* + 0.2 detik waktu *sensing* dan waktu *open circuit breaker*). Kemudian akan dilakukan analisa terhadap respon frekuensi tegangan, dan sudut rotor apakah masih sesuai dengan standar

dan apabila tidak maka diperlukan mekanisme lebih lanjut untuk memperbaiki kestabilan sistem.



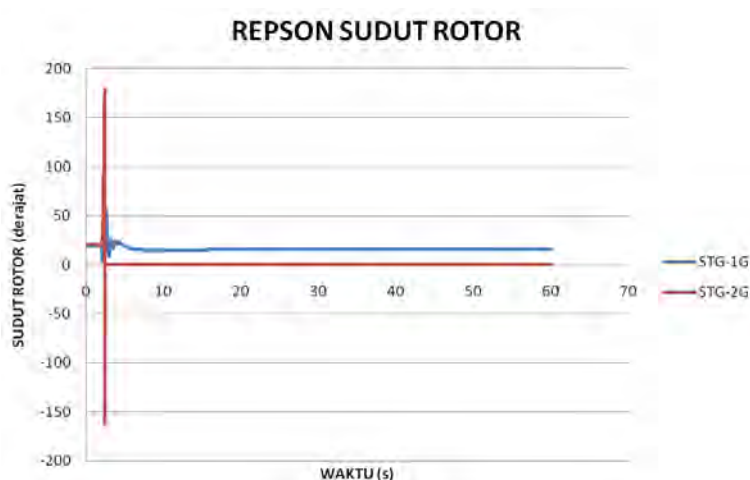
**Gambar 4.49** Respons Frekuensi Pada Kasus *short circuit* Bus 00AHC20

Gambar 4.49 menunjukkan respon frekuensi bus pada saat gangguan hubung singkat bus 00AHC20 diikuti *CB open* pada  $t = 0.5$  detik. Dapat dilihat pada gambar bahwa frekuensi pada bus SWGR B yang terhubung dengan bus 00AHC20 secara langsung mengalami penurunan frekuensi hingga mencapai 0% pada  $t=8.78$  detik. Pada bus lainnya juga mengalami penurunan yang drastis hingga mencapai nilai 49.58% pada  $t=60$  detik apabila tidak ditindaklanjuti maka frekuensi pada sistem akan terus menurun sehingga diperlukan *load shedding* agar sistem kembali stabil.



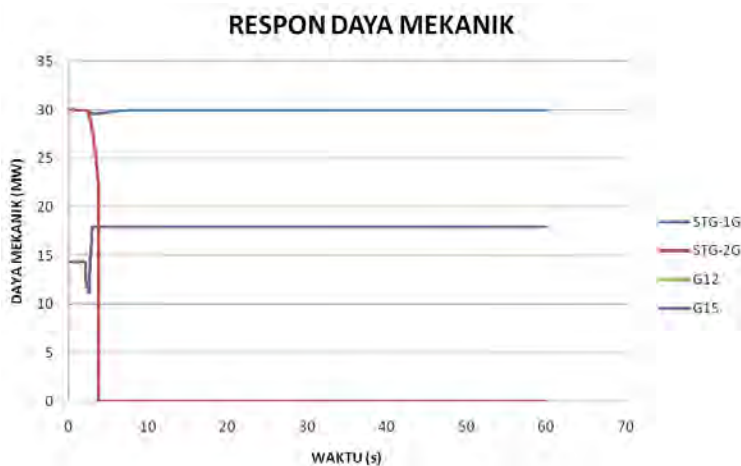
**Gambar 4.50** Respons Tegangan Pada Kasus *short circuit* Bus 00AHC20

Gambar 4.50 menunjukkan respon tegangan bus pada saat gangguan hubung singkat bus 00AHC20 diikuti *CB open* pada  $t = 0.5$  detik. Dapat dilihat pada gambar bahwa tegangan pada bus SWGR B yang terhubung dengan bus 00AHC20 secara langsung mengalami penurunan tegangan yang sangat drastis hingga mencapai 0% pada  $t=4.76$  detik. Sedangkan pada bus lainnya hanya mengalami penurunan kecil yang bersifat sementara yang akhirnya kurang lebih stabil pada 100.5%



**Gambar 4.51** Respons Sudut Rotor Pada Kasus *short circuit* Bus 00AHC20

Gambar 4.51 menunjukkan respons sudut rotor saat terjadi gangguan *short circuit* pada bus 00AHC20 (30KV). Pada STG-1G mengalami penurunan dari awalnya 19.54 derajat menjadi 4.05 derajat pada waktu  $t=2.22$  detik dan naik kembali hingga 55.1 derajat pada  $t=2.66$  detik dan terus berosilasi namun kemudian kembali stabil pada 16.1 derajat. Terlihat pada kurva merah bahwa STG-2G mengalami osilasi yang sangat besar yaitu dari 179.13 derajat pada  $t=2.42$  detik menjadi -162.41 derajat pada  $t=2.44$  detik sehingga perlu dipertimbangkan untuk dilakukan *generator shedding* pada generator STG-2. Pada kasus ini diperlukan adanya mekanisme *load shedding* untuk memperbaiki respons frekuensi yang terus menurun.



**Gambar 4.52** Respons Daya Mekanik Pada Kasus *short circuit* Bus 00AHC20

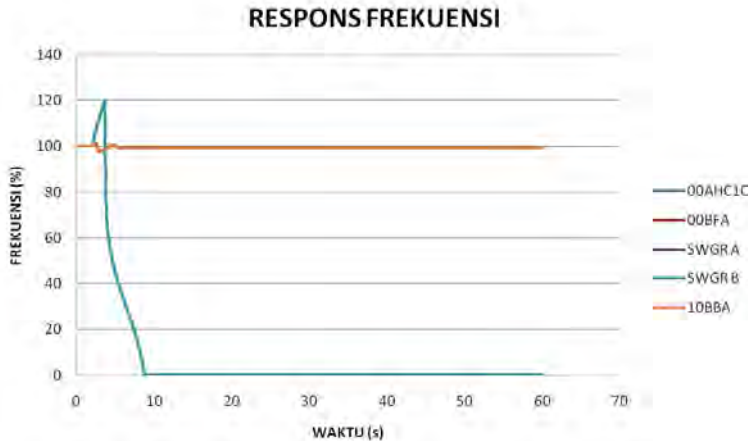
Pada Gambar 4.52 menunjukkan bahwa generator STG-2G lepas dari sistem sehingga menyebabkan penurunan frekuensi pada sistem dikarenakan daya pembangkitan lebih kecil dari pada beban yang dipikul atau *overload*. Dalam gambar tersebut terlihat bahwa generator G12 dan G15 mengalami peningkatan daya mekanik hingga 17.97 MW dalam hal ini generator ini telah meningkat hampir mencapai daya mampu maksimal yaitu 18MW. Sehingga sangat dianjurkan untuk melakukan *load shedding* agar generator tidak mengalami kerusakan karena kelebihan beban.

#### **4.3.6.1. Studi Kasus Short Circuit Pada Bus 00AHC20 (30KV) dan Load Shedding**

Pada sub-bab ini akan dijelaskan mengenai mekanisme pelepasan beban untuk memberikan solusi terhadap kasus hubung singkat pada bus 00AHC20 (30KV) yang merupakan bus transmisi. Pada kasus hubung singkat 00AHC20 (30KV) terjadi penurunan frekuensi hingga 49.58% pada  $t=60$  detik apabila tidak ditindaklanjuti maka frekuensi pada sistem akan terus menurun hingga terjadi sistem *blackout* sehingga diperlukan *load shedding* agar sistem kembali stabil. Pelepasan beban dilakukan

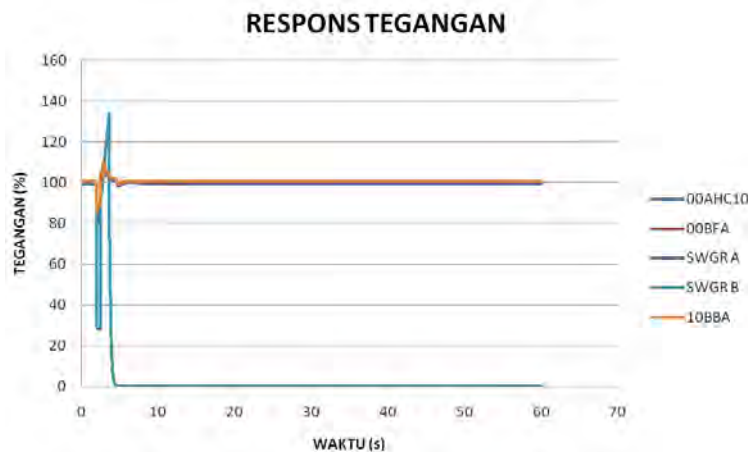


saat frekuensi mencapai nilai 98.83% yaitu saat  $t = 2.70$  detik + delay 6 cycle (0.12 s) sehingga pelepasan beban dilakukan saat  $t = 2.82$  detik. Jumlah beban yang dilepas menurut standar adalah 10% dari beban total sehingga diperoleh 15.98 MW. Apabila dengan adanya *load shedding* tahap 1 ini masih belum mencapai standar maka diperlukan *load shedding* tahap selanjutnya.



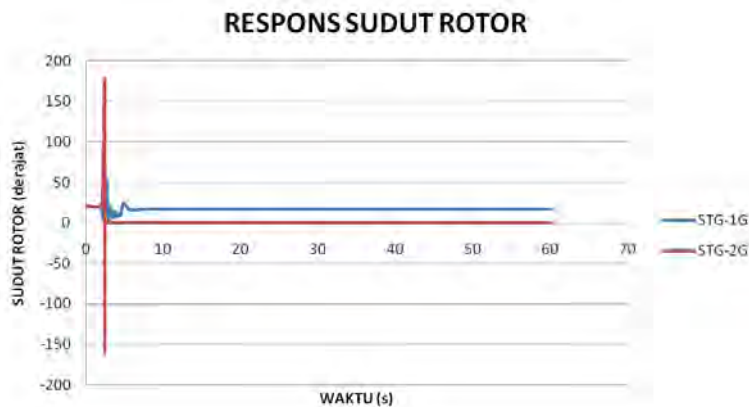
**Gambar 4.53** Respons Frekuensi Pada Kasus *short circuit* Bus 00AHC20 dan Load Shedding

Gambar 4.53 menunjukkan respon frekuensi bus pada saat gangguan hubung singkat bus 00AHC20 diikuti *CB open* pada  $t = 0.5$  detik atau pada  $t = 2.5$  detik dan dilanjutkan dengan Load Shedding pada saat  $t = 2.82$  detik. Dapat dilihat pada gambar bahwa frekuensi pada bus SWGR B yang terhubung dengan bus 00AHC20 secara langsung mengalami penurunan frekuensi hingga mencapai 0% pada  $t = 8.78$  detik hal ini karena CB telah bekerja memutuskan bus yang terkena gangguan. Namun pada bus lainnya terlihat bahwa respons frekuensi telah mengalami kestabilan pada 99.5% pada saat  $t = 5.42$  detik meskipun terjadi peningkatan hingga 101.5% pada saat  $t = 2.34$  detik dan penurunan hingga 97.68% pada saat  $t = 2.96$  detik namun kedua nilai ini masih termasuk aman dan sesuai dengan standar yang digunakan. Sehingga tidak diperlukan mekanisme *load shedding* tahap selanjutnya.



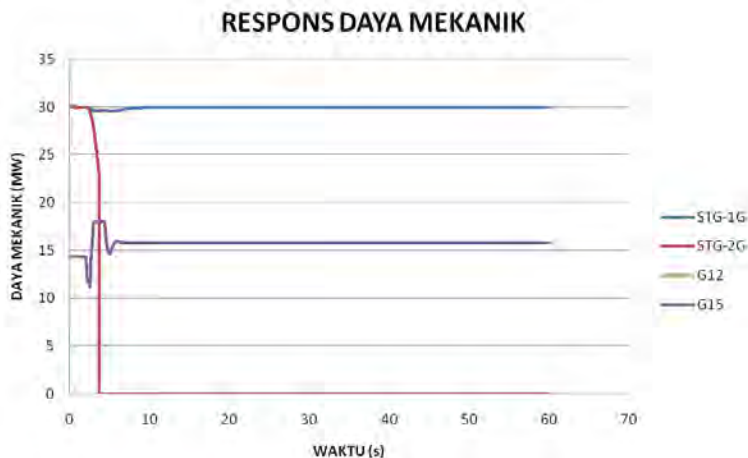
**Gambar 4.54** Respons Tegangan Pada Kasus *short circuit* Bus 00AHC20 dan Load Shedding

Gambar 4.54 menunjukkan respon tegangan bus pada saat gangguan hubung singkat bus 00AHC20 diikuti *CB open* pada  $t = 0.5$  detik. Dapat dilihat pada gambar bahwa tegangan pada bus SWGR B yang terhubung dengan bus 00AHC20 secara langsung mengalami penurunan tegangan yang sangat drastis hingga mencapai 0% pada  $t=4.76$  detik hal ini dikarenakan CB telah bekerja memutuskan bus yang terkena gangguan. Sedangkan pada bus lainnya hanya mengalami penurunan kecil yang bersifat sementara yang akhirnya kurang lebih stabil pada 100.5%



**Gambar 4.55** Respons Sudut Rotor Pada Kasus *short circuit* Bus 00AHC20 dan Load Shedding

Gambar 4.55 menunjukkan respons sudut rotor saat terjadi gangguan *short circuit* pada bus 00AHC20 (30KV). Pada STG-1G mengalami penurunan dari awalnya 19.54 derajat menjadi 4.05 derajat pada waktu  $t=2.22$  detik dan naik kembali hingga 55.1 derajat pada  $t=2.66$  detik dan terus berosilasi namun kemudian kembali stabil pada 16.1 derajat. Terlihat pada kurva merah bahwa STG-2G mengalami osilasi yang sangat besar yaitu dari 179.13 derajat pada  $t=2.42$  detik menjadi -162.41 derajat pada  $t=2.44$  detik sehingga perlu dipertimbangkan untuk melakukan *generator shedding* sebelum terjadi hal tersebut untuk generator STG-2G agar tidak merusak generator. Karena dapat kita lihat pada kurva bahwa *load shedding* pada kasus ini tidak mampu memperbaiki *overspeed* yang terjadi pada generator STG-2G.

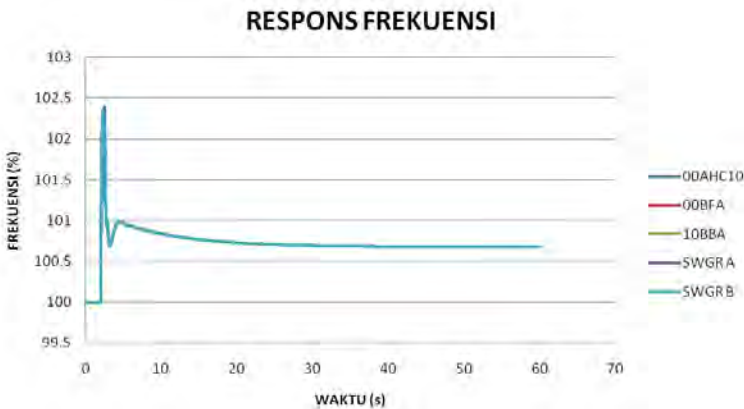


**Gambar 4.56** Respons Daya Mekanik Pada Kasus *short circuit* Bus 00AHC20 dan Load Shedding

Pada Gambar 4.56 menunjukkan bahwa generator STG-2G lepas dari sistem sehingga sebelumnya menyebabkan penurunan frekuensi pada sistem dikarenakan daya pembangkitan lebih kecil dari pada beban yang dipikul atau *overload* namun dengan adanya mekanisme *load shedding* maka frekuensi tidak lagi menurun. Dan selain itu pada gambar tersebut terlihat bahwa generator G12 dan G15 mengalami peningkatan daya mekanik hingga 15.97 MW pada saat  $t=9.30$  detik sehingga berbeda dengan sebelumnya dimana kedua generator telah meningkat hampir mencapai daya mampu maksimal yaitu 18MW. Dengan adanya pelepasan beban menyebabkan daya mekanik yang perlu disalurkan oleh generator menurun sehingga mampu memperpanjang masa hidup atau *lifespan* dari generator karena tidak perlu bekerja maksimal pada daya mampu generator.

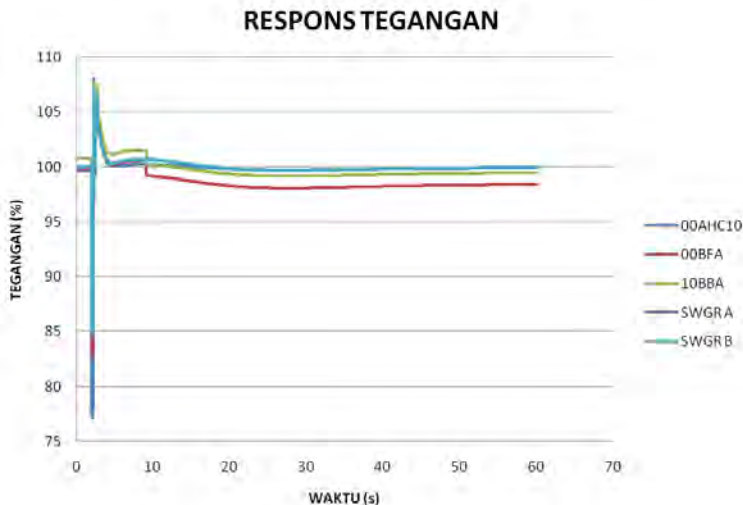
#### 4.3.7. Studi Kasus Short Circuit Pada Bus PP-2 (6.6KV)

Pada sub bab ini akan disimulasikan gangguan hubung singkat (*short circuit*) tiga fasa pada level tegangan 6.6KV. Bus PP-2 disimulasikan terjadi hubung singkat pada  $t = 2.00$  detik. Setting relay *differential* yang melindungi bus PP-2 adalah 3 cycle (0.06 detik). Pada simulasi relay akan open pada saat  $t = 0.26$  detik (0.06 detik setting relay + 0.2 detik waktu sensing dan waktu open circuit breaker). Kemudian akan dilakukan analisa terhadap respon frekuensi tegangan, dan sudut rotor apakah masih sesuai dengan standar dan apabila tidak maka diperlukan mekanisme lebih lanjut untuk memperbaiki kestabilan sistem.



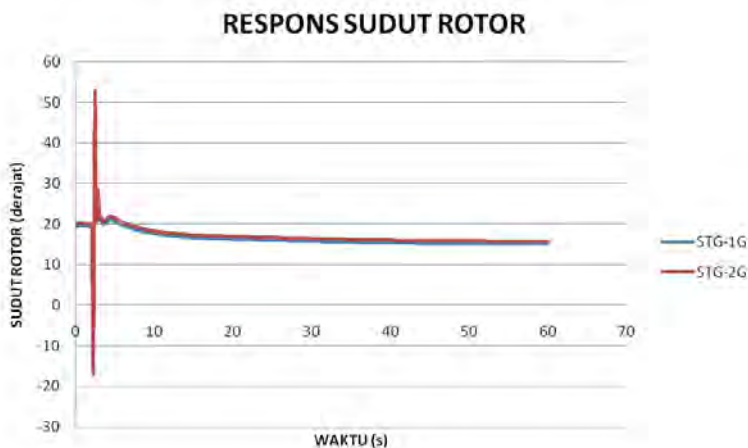
**Gambar 4.57** Respons Frekuensi Pada Kasus *short circuit* Bus PP-2

Gambar 4.57 menunjukkan respon frekuensi bus pada saat gangguan hubung singkat bus PP-2 diikuti dengan *CB open* pada  $t = 0.26$  detik. Pada gambar menunjukkan bahwa frekuensi sistem mengalami kenaikan hingga 102.31% pada  $t=2.23$  detik dan kemudian turun 100.75% stabil pada 100.67% pada  $t=60$  detik . Sehingga dapat dikatakan bahwa respons frekuensi pada saat gangguan hubung singkat di bus PP-2 masih tergolong aman dan sesuai dengan standar yang digunakan.



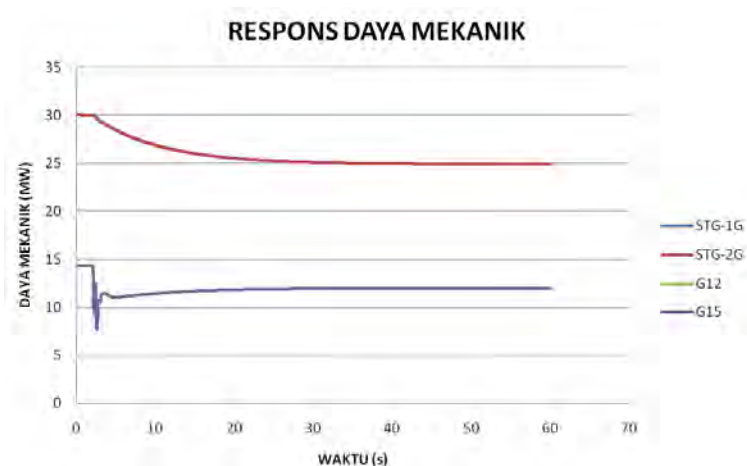
**Gambar 4.58** Respons Tegangan Pada Kasus *short circuit* Bus PP-2

Gambar 4.58 menunjukkan respon tegangan bus pada saat gangguan hubung singkat bus PP-2 diikuti dengan *CB open* pada  $t = 0.26$  detik. Pada gambar menunjukkan bahwa tegangan pada bus 00AHC10 menurun hingga 77.19% pada  $t=2.06$  detik dan naik hingga 108.01% pada  $t=2.31$  detik dan kemudian stabil pada 99.7%. Pada bus 00BFA tegangan stabil pada 98.1%. Sehingga respons tegangan pada kasus hubung singkat bus PP-2 masih tergolong aman dan sesuai dengan standar yang digunakan.



**Gambar 4.59** Respons Sudut Rotor Pada Kasus *short circuit* Bus PP-2

Gambar 4.59 menunjukkan respons sudut rotor saat terjadi gangguan *short circuit* pada bus PP-2 (6.6KV). Pada generator STG-1G mengalami penurunan dari awalnya 19.54 derajat menjadi -16.95 derajat pada waktu  $t=2.20$  detik dan naik kembali hingga 52.6 derajat pada  $t=2.45$  detik dan terus berosilasi dan menurun secara eksponensial hingga mencapai nilai 15.08 derajat pada  $t=60$  detik. Generator STG-2G mengalami penurunan dari awalnya 20.28 derajat menjadi -16.05 derajat pada waktu  $t=2.20$  detik dan naik kembali hingga 53.12 derajat pada  $t=2.43$  detik dan terus berosilasi dan menurun secara eksponensial hingga mencapai nilai 15.81 derajat pada  $t=60$  detik. Sehingga dapat disimpulkan respons sudut rotor pada kasus ini telah sesuai dengan standar yang diperbolehkan.



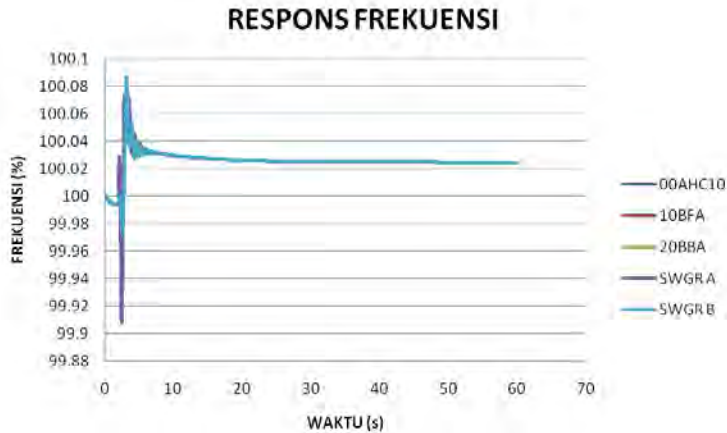
**Gambar 4.60** Respons Daya Mekanik Pada Kasus *short circuit* Bus PP-2

Pada Gambar 4.60 menunjukkan bahwa masing-masing generator mengalami penurunan daya mekanik, hal ini dikarenakan CB telah memutuskan hubungan pada bus PP-2 yang merupakan memiliki beban sebesar kurang lebih 26 MW sehingga terjadi pengurangan beban pada sistem. Daya mekanik pada generator STG-1G dan STG-2G menurun hingga 24.92 MW dan generator G12 dan G15 menurun hingga 12 MW sehingga dapat dikatakan bahwa generator beroperasi lebih rendah daripada operasi normal karena berkurangnya beban sistem kelistrikan.

#### 4.3.8. Studi Kasus Short Circuit Pada Bus 00BFA (0.4KV)

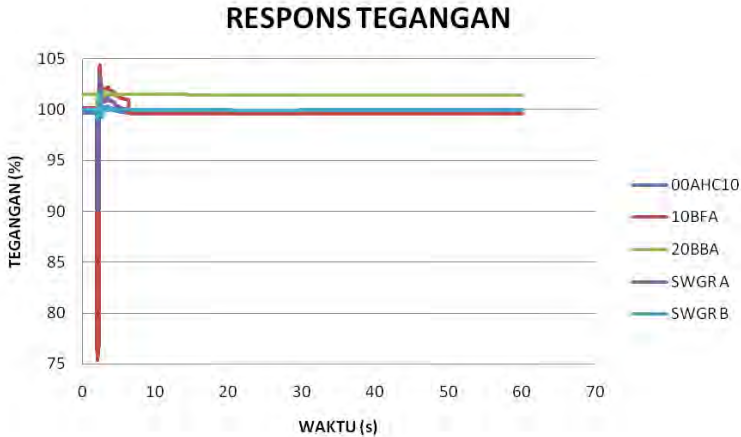
Pada sub bab ini akan disimulasikan gangguan hubung singkat (*short circuit*) tiga fasa pada level tegangan 0.4KV. Bus 00BFA disimulasikan terjadi hubung singkat pada  $t = 2.00$  detik. *Setting relay low voltage* CB 00BFT11 yang melindungi bus 00BFA adalah 0.1 detik. Namun pada simulasi *relay* akan *open* pada saat  $t = 0.3$  detik (0.1 detik *setting relay* + 0.2 detik waktu *sensing* dan waktu *open circuit breaker*). Kemudian akan dilakukan analisa terhadap respon frekuensi tegangan, dan sudut rotor apakah masih sesuai dengan standar dan apabila tidak maka diperlukan mekanisme lebih lanjut untuk memperbaiki kestabilan sistem.





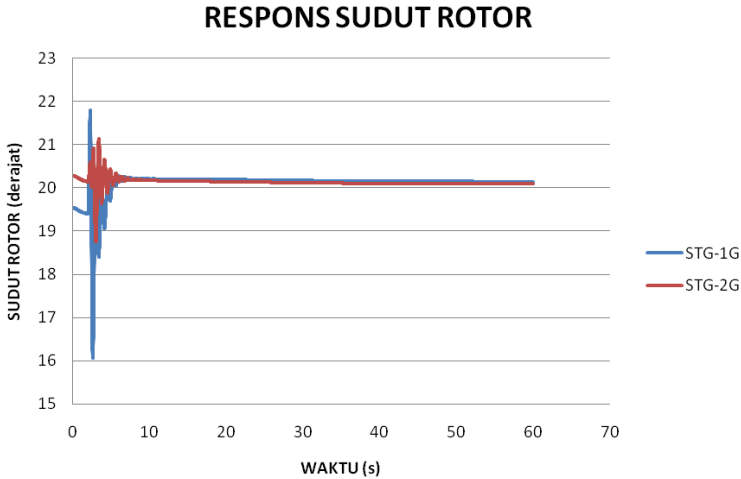
**Gambar 4.61** Respons Frekuensi Pada Kasus *short circuit* Bus 00BFA

Gambar 4.61 menunjukkan respon frekuensi bus pada saat gangguan hubung singkat bus 00BFA diikuti dengan *CB open* pada  $t = 0.3$  detik. Pada gambar menunjukkan bahwa frekuensi sistem mengalami penurunan hingga 99.9% pada saat  $t=2.48$  detik dan kenaikan hingga 100.086% pada  $t=3.18$  detik dan kembali stabil pada 100.03% saat  $t=4.741$  detik. Sehingga dapat dikatakan bahwa respons frekuensi pada saat gangguan hubung singkat di bus 00BFA masih tergolong aman dan sesuai dengan standar yang digunakan.



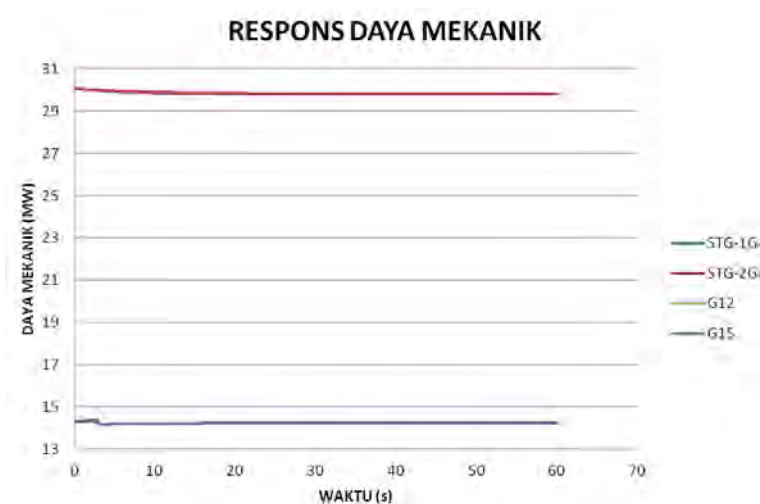
**Gambar 4.62** Respons Tegangan Pada Kasus *short circuit* Bus 00BFA

Gambar 4.62 menunjukkan respon tegangan bus pada saat gangguan hubung singkat bus 00BFA diikuti dengan *CB open* pada  $t = 0.3$  detik. Pada gambar menunjukkan bahwa tegangan pada bus 10BFA mengalami penurunan hingga 75.37% pada saat  $t=2.101$  detik dan kembali naik ke 99.9% pada  $t=2.3$  detik. Penurunan ini terjadi karena bus 10BFA terhubung dengan bus 00BFA melalui bus 10BBA (6.6KV) sehingga saat bus 00BFA terjadi arus hubung singkat maka tegangan pada bus 10BBA akan menurun begitu pula dengan tegangan pada bus 10BFA juga akan menurun namun setelah bus 00BFA diputuskan dari sistem dengan membuka CB 00BFT11 maka tegangan kembali ke keadaan normal. Sehingga respons tegangan pada kasus hubung singkat bus 00BFA masih tergolong aman dan sesuai dengan standar yang digunakan.



**Gambar 4.63** Respons Sudut Rotor Pada Kasus *short circuit* Bus 00BFA

Gambar 4.63 menunjukkan respons sudut rotor saat terjadi gangguan *short circuit* pada bus 00BFA (0.4KV). Terlihat pada gambar bahwa sudut rotor pada STG-1G mengalami osilasi sesaat dengan nilai terendah mencapai 16.07 derajat pada waktu  $t=2.62$  detik namun kembali stabil pada 20.17 derajat. STG-2G hanya mengalami osilasi sesaat setelah terjadi gangguan namun kembali stabil pada 20.26 derajat. Sehingga sudut rotor masih dalam standar yang diperbolehkan.

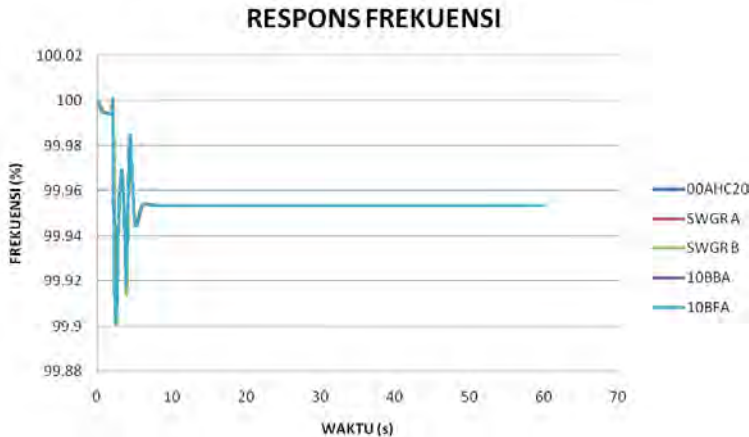


**Gambar 4.64** Respons Daya Mekanik Pada Kasus *short circuit* Bus 00BFA

Pada Gambar 4.64 menunjukkan bahwa masing-masing generator mengalami penurunan daya mekanik, hal ini dikarenakan CB telah memutuskan hubungan pada bus 00BFA sehingga terjadi pengurangan beban pada sistem. Daya mekanik pada generator STG-1G dan STG-2G menurun hingga 29.8 MW dan generator G12 dan G15 menurun hingga 14.25 MW sehingga dapat dikatakan bahwa generator beroperasi lebih rendah daripada operasi normal karena berkurangnya beban sistem kelistrikan

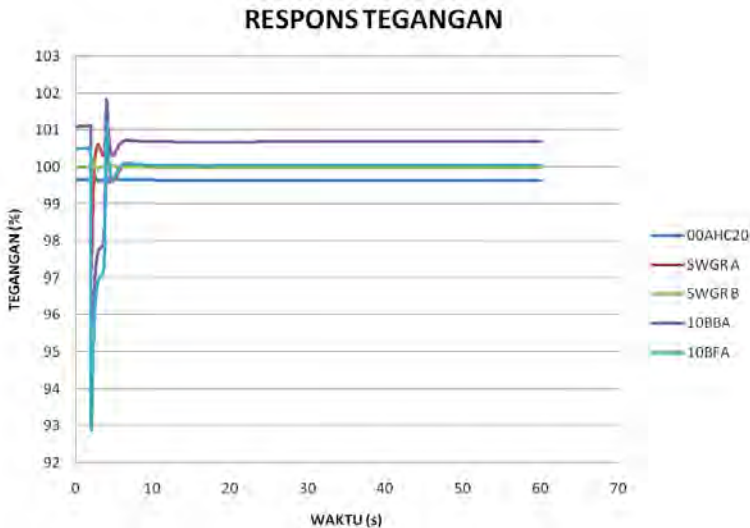
#### 4.3.9. Studi Kasus Motor M-BFP1A (930 kW) Start

Pada sub bab kali ini akan dilakukan simulasi *starting* motor terbesar pada sistem kelistrikan PT. Aneka Tambang Pomalaa. Dalam kasus ini, motor M-BFP1A berkapasitas 930 kW akan dinyalakan pada  $t = 2$  detik saat semua generator ON di sistem kelistrikan dan dalam keadaan beban penuh saat normal operasi. Metode *starting motor* yang digunakan yaitu DOL (*Direct On Line*) sehingga pada simulasi digambarkan dengan menghubungkan *switch* atau CB ke keadaan ON (*close CB*) pada sistem. Respons frekuensi, tegangan, sudut rotor dan arus dapat dilihat pada gambar dibawah ini:



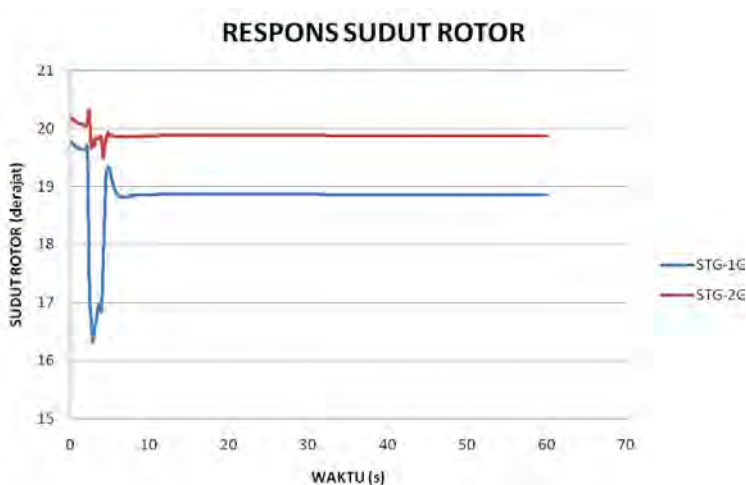
**Gambar 4.65** Respons Frekuensi Pada Kasus M-BFP1A (930 kW) *start*

Gambar 4.65 menunjukkan respon frekuensi sistem pada saat motor M-BFP1A *start* pada  $t = 2$  detik. Terlihat dari grafik bahwa pada saat motor mulai *starting* terjadi sedikit osilasi. Frekuensi sempat dua kali mengalami penurunan. Pertama pada saat  $t=2.51$  detik turun hingga 99.90% dan yang kedua pada saat  $t=3.92$  detik turun hingga 99.91 %. Namun frekuensi kembali pada kondisi stabil pada 99.95%. Dengan demikian dapat kita simpulkan bahwa untuk kasus motor M-BFP1A *start* frekuensi sistem masih berada pada batas yang diperbolehkan.



**Gambar 4.66** Respons Tegangan Pada Kasus M-BFP1A (930 kW) *start*

Gambar 4.66 menunjukkan respon tegangan bus pada saat motor M-BFP1A *start* pada saat  $t=2$  detik. Pada saat motor *starting* bus 10BFA (Level tegangan 0.4 kV) sempat mengalami penurunan hingga 92.88% pada  $t=2.08$  detik dan naik mencapai 101.23% saat  $t=4.02$  detik kemudian stabil pada 100.05%. Bus 10BBA (Level tegangan 6.6 kV) yang merupakan bus tempat motor M-BFP1A berada sempat mengalami penurunan hingga 93.72% pada  $t=2.06$  detik dan naik mencapai 101.84% saat  $t=4.02$  detik kemudian stabil pada 100.6%. Bus SWGR A (Level tegangan 11 kV) yang merupakan bus generator STG-1G yang menyuplai daya pada bus 10BBA sempat mengalami penurunan hingga 97.18% pada  $t=2.06$  detik dan naik mencapai 101.39% saat  $t=3.98$  detik kemudian stabil pada 100.0%. Bus SWGR B dan Bus 00AHC20 tidak terjadi perubahan yang signifikan sehingga masih dalam batas yang diijinkan. Dengan demikian dapat disimpulkan bahwa respons tegangan sistem pada kasus motor M-BFP1A *start* masih dalam batas yang diperbolehkan.



**Gambar 4.67** Respons Sudut Rotor Pada Kasus M-BFP1A (930 kW) *start*

Pada Gambar 4.67 menunjukkan respon sudut rotor pada saat motor M-BFP1A *start* pada  $t=2$  detik. Terlihat sesaat setelah motor dinyalakan terjadi penurunan sudut rotor pada generator STG-1G. Sudut rotor pada generator STG-1G menurun dari 19.76 derajat hingga 16.32 derajat pada  $t=2.84$  detik namun kembali naik dan stabil pada 18.87 derajat. Sedangkan untuk generator STG-2G tidak terjadi penurunan yang signifikan yaitu dari awalnya 20.19 derajat hingga 19.67 derajat dan kembali stabil pada 19.88 derajat. Berdasarkan hasil simulasi kasus di atas dapat disimpulkan bahwa pada kasus tersebut kondisi sistem masih dalam keadaan stabil melihat respon frekuensi, respon tegangan dan respon sudut rotor yang masih berada dalam standar yang diperbolehkan.

## **BAB V**

### **PENUTUP**

#### **5.1 Kesimpulan**

Berdasarkan hasil analisa yang diperoleh dari simulasi kestabilan transien yang telah dilakukan pada tugas akhir ini, dapat diambil beberapa kesimpulan sebagai berikut:

- a) Pada kasus lepasnya generator, dari kasus-kasus yang telah dipilih menunjukkan bahwa sistem kelistrikan selalu memerlukan *load shedding* setiap terjadi gangguan generator lepas kecuali pada saat lepasnya satu generator berkapasitas 17 MW, dikarenakan sistem masih mampu memikul beban total. Pada kasus lainnya sistem selalu mengalami penurunan frekuensi dan tegangan yang tidak diperbolehkan dalam standar.
- b) Pada kasus 2 generator *outage*, kejadian lepasnya generator STG-1G dan STG-2G merupakan kasus yang paling berbahaya karena menyebabkan sistem *blackout* dalam jangka waktu yang sangat cepat. Hal ini disebabkan karena sistem kehilangan 2 pembangkitan terbesar pada sistem kelistrikan.
- c) *Load shedding* status memberikan respons frekuensi setelah gangguan yang lebih baik daripada *load shedding* frekuensi. Sebab respons frekuensi sistem saat menggunakan *load shedding* status lebih cepat menuju keadaan stabil selain itu beban yang dilepaskan lebih efisien.
- d) Pada kasus hubung singkat di level tegangan 0.4 kV, 6.6 kV dan 30 kV, kasus yang perlu diperhatikan adalah saat terjadi hubung singkat pada bus 00AHC20 (30 kV) . Pada kasus hubung singkat bus 00AHC20 diperlukan adanya *load shedding* agar sistem kembali stabil dikarenakan oleh lepasnya generator STG-2G. Pada kasus hubung singkat lainnya gangguan dapat diatasi dengan baik sehingga masih sesuai dengan standar yang diperbolehkan.
- e) Pada kasus motor *starting*. Ketika motor M-BFP1A berkapasitas 930 kW *starting* secara *direct on-line* dengan sistem kelistrikan beroperasi normal dengan beban penuh tidak terjadi penurunan yang besar pada respons tegangan sistem.



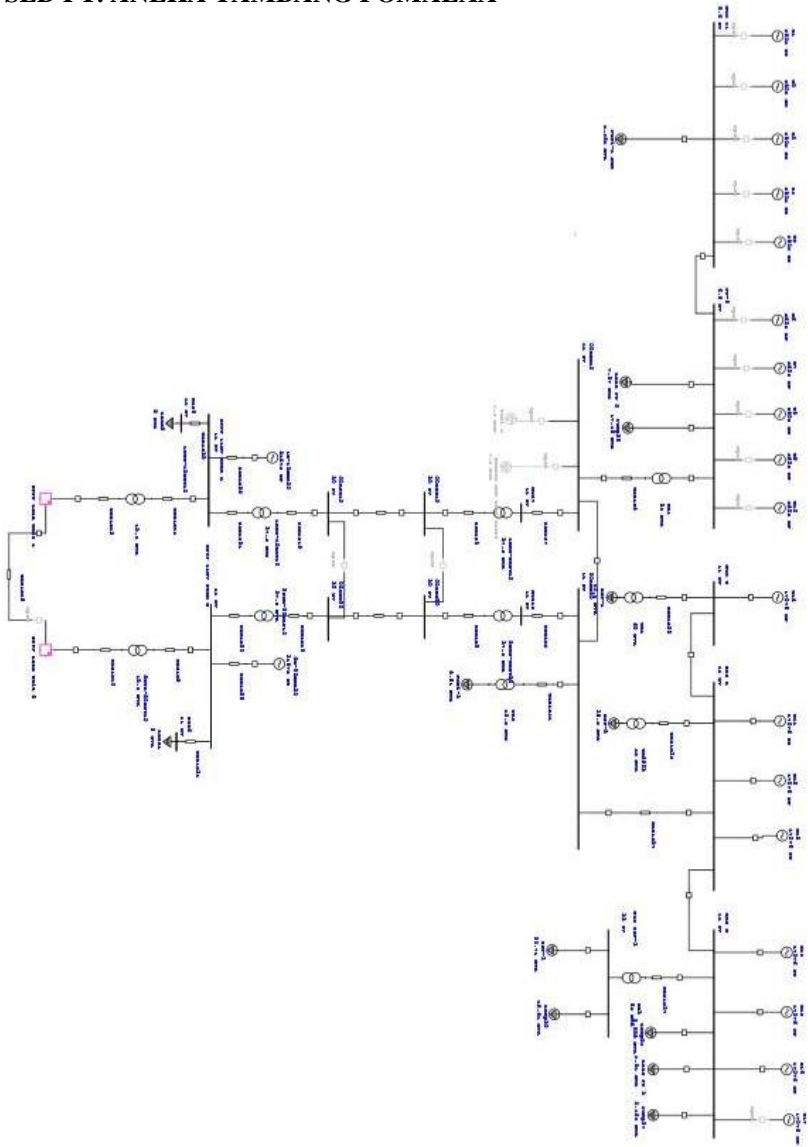
## 5.2 Saran

Saran yang diberikan setelah dilakukan analisis kestabilan transien pada sistem kelistrikan PT.Aneka Tambang Pomalaa adalah sebagai berikut :

- a) Untuk kasus lepasnya satu generator yang perlu diperhatikan adalah saat generator STG-2G (32 MW) lepas memerlukan *load shedding* satu tahap untuk mengembalikan sistem ke keadaan stabil. *Load shedding* tahap 1 dilakukan dengan melepas beban sebesar 10% dari beban total yaitu sekitar 15.98 MW.
- b) Untuk kasus lepasnya dua generator. Semuanya memerlukan adanya mekanisme *Load shedding* untuk kembali stabil. Pada kasus lepasnya generator STG-1G dan STG-2G perlu diperhatikan karena dapat menyebabkan terjadinya sistem *blackout* dengan jangka waktu yang sangat cepat. Pada kasus ini memerlukan *load shedding* frekuensi 3 tahap agar sistem dapat kembali stabil. Total beban yang dilepas pada kasus ini hingga mencapai sekitar 48.44 MW. Pada kasus lepasnya generator G11 dan STG-2G juga menyebabkan terjadinya *blackout*, kasus ini dapat ditangani dengan melakukan mekanisme *load shedding* 2 tahap dengan total beban yang dilepas sebesar kurang lebih 37.57 MW agar sistem kembali stabil.
- c) Untuk skema *load shedding* akan lebih baik jika menggunakan *load shedding* status sebagai mekanisme utama karena dapat membuat sistem mencapai kestabilan lebih cepat dan efisien. Namun skema *load shedding* status ini perlu di *back up* dengan *load shedding* frekuensi.
- d) Untuk kasus hubung singkat pada bus 00AHC20 (30 kV) yang merupakan penghubung antara pembangkit lama dengan pembangkit baru menyebabkan lepasnya generator STG-2G (32 MW) dari sistem kelistrikan sehingga terjadi *overload* pada sistem. Hal ini dapat diatasi dengan melakukan *load shedding* 1 tahap dengan beban yang dilepas sebesar 15.98 MW agar sistem kembali stabil.

## LAMPIRAN

### SLD PT. ANEKA TAMBANG POMALAA



## Rekapitulasi Beban *Load Shedding*

<i>Load Shedding 1</i>		
NO	LOAD	Normal Operation (kW)
1	ESF-3 PP-3	15980
<b>TOTAL</b>		<b>15980</b>
<i>Load Shedding 2</i>		
1	New Receive SubS PP-2	14840
2	LF-Electrical PP-3	3480
3	ESF-3 PP-3	3513
<b>TOTAL</b>		<b>21833</b>
<i>Load Shedding 3</i>		
1	Load-PP 3	4762
2	Load-PP 2	6107
<b>TOTAL</b>		<b>10869</b>

### Rekapitulasi Kondisi Frekuensi dan Tegangan Semua Studi Kasus

Case	Bus Freq Min	Bus Freq Steady State	ID Bus	V min (%)	V steady (%)	Condition	
						FREKUENSI	VOLTAGE
G11 OFF	99.06	99.28	PP-2	95.20	98.37	OK	OK
			SWGR B	98.2	100.04		OK
			SWGR A	98.2	100.04		OK
			10 BBA	98.9	100.08		OK
			00AHC20	97.33	99.69		OK
STG-2G OFF	NOT STABLE	NOT STABLE	PP-2	NOT STABLE	NOT STABLE	X	X
			SWGR B	NOT STABLE	NOT STABLE		X
			SWGR A	NOT STABLE	NOT STABLE		X
			10 BBA	NOT STABLE	NOT STABLE		X
			00AHC20	NOT STABLE	NOT STABLE		X

STG-2G OFF LS	98.41	99.4	PP-2	96.84	98.30	OK	OK
			SWGR B	96.67	98.13		OK
			SWGR A	95.49	99.97		OK
			10 BBA	96.141	100.79		
			00AHC20	97.4	98.83		
G11 + G18 OFF	NOT STABLE	NOT STABLE	PP-2	NOT STABLE	NOT STABLE	X	X
			SWGR B	NOT STABLE	NOT STABLE		X
			SWGR A	NOT STABLE	NOT STABLE		X
			10 BBA	NOT STABLE	NOT STABLE		X
			00AHC20	NOT STABLE	NOT STABLE		X
G11 + G18 OFF LS	98.68	99.24	PP-2	94.02	98.37	OK	OK
			SWGR B	97.29	99.98		OK
			SWGR A	97.29	99.97		OK
			10 BBA	97.99	100.79		OK
			00AHC20	96.35	99.65		OK

G11 + 2G OFF	NOT STABLE	NOT STABLE	PP-2	NOT STABLE	NOT STABLE	X	X
			SWGR B	NOT STABLE	NOT STABLE		X
			SWGR A	NOT STABLE	NOT STABLE		X
			10 BBA	NOT STABLE	NOT STABLE		X
			00AHC20	NOT STABLE	NOT STABLE		X
G11 + 2G OFF LS	NOT STABLE	NOT STABLE	PP-2	NOT STABLE	NOT STABLE	X	X
			SWGR B	NOT STABLE	NOT STABLE		X
			SWGR A	NOT STABLE	NOT STABLE		X
			10 BBA	NOT STABLE	NOT STABLE		X
			00AHC20	NOT STABLE	NOT STABLE		X

G11 + 2G OFF LS 2	97.71	99.64	PP-2	96.63	102.15	OK	OK
			SWGR B	96.45	98.23		OK
			SWGR A	96.04	99.97		OK
			10 BBA	96.07	100.79		OK
			00AHC20	97.23	98.93		OK
G11 + 2G OFF LS STATUS	97.48	99.19	PP-2	95.20	98.30	OK	OK
			SWGR B	96.45	98.13		OK
			SWGR A	94.19	99.97		OK
			10 BBA	94.81	100.79		OK
			00AHC20	97.23	98.83		OK
STG-1G + STG-2G OFF	NOT STABLE	NOT STABLE	PP-2	NOT STABLE	NOT STABLE	X	X
			SWGR B	NOT STABLE	NOT STABLE		X
			SWGR A	NOT STABLE	NOT STABLE		X
			10 BBA	NOT STABLE	NOT STABLE		X
			00AHC20	NOT STABLE	NOT STABLE		X

STG-1G + STG-2G OFF LS	NOT STABLE	NOT STABLE	PP-2	NOT STABLE	NOT STABLE	X	X
			SWGR B	NOT STABLE	NOT STABLE		X
			SWGR A	NOT STABLE	NOT STABLE		X
			10 BBA	NOT STABLE	NOT STABLE		X
			00AHC20	NOT STABLE	NOT STABLE		X
STG-1G + STG-2G OFF LS 2	95.12	99.02	PP-2	94.79	102.07	WARNING	OK
			SWGR B	94.86	98.16		OK
			SWGR A	94.00	97.33		OK
			10 BBA	94.36	99.31		OK
			00AHC20	95.61	98.86		OK
STG-1G + STG-2G OFF LS 3	95.97	99.51	PP-2	95.02	103.55	OK	OK
			SWGR B	94.87	98.20		OK
			SWGR A	94.00	97.37		OK
			10 BBA	94.36	99.34		OK
			00AHC20	95.61	98.90		OK



STG-1G + STG-2G OFF LS STATUS	97.57	99.5	PP-2	94.79	99.93	OK	OK
			SWGR B	94.87	98.10		OK
			SWGR A	94.02	97.26		OK
			10 BBA	94.36	99.23		OK
			00AHC20	95.61	98.80		OK
SC 30 KV Bus 00AHC20	NOT STABLE	NOT STABLE	00AHC10	79.17	99.55	OK	OK
			00BFA	84.03	98.49		OK
			SWGR A	85.60	99.91		OK
			SWGR B	0	0		OK
			10 BBA	85.85	99.5		OK
SC 30 KV Bus 00AHC20 LS	97.68	99.57	00AHC10	79.17	99.55	OK	OK
			00BFA	84.03	98.49		OK
			SWGR A	85.60	99.91		OK
			SWGR B	0	0		OK
			10 BBA	85.85	99.5		OK

SC 6.6 KV Bus PP-2	100	100.67	00AHC10	77.19	99.87	OK	OK
			00BFA	82.87	98.41		OK
			SWGR A	84.53	99.95		OK
			SWGR B	84.63	99.95		OK
			10 BBA	84.77	99.46		OK
SC 0.4 KV BUS 00BFA	99.9	100.03	00AHC10	93.41	99.65	OK	OK
			10BFA	75.37	99.57		OK
			SWGR A	90.28	99.97		OK
			SWGR B	98.96	99.98		OK
			20 BBA	100.77	101.48		OK
MOTOR M-BFP1A (930 KW) START	99.90	99.95	00AHC20	99.29	99.65	OK	OK
			SWGR A	97.18	99.97		OK
			SWGR B	99.75	99.98		OK
			10 BBA	93.72	100.68		OK
			10 BFA	92.88	100.05		OK

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] IEEE/CIGRE Joint Task Force on Stability Terms and Definitions, *“Definition and Classification of Power System Stability”* IEEE
- [2] Kundur, Prabha, *“Power System Stability and Control”*, McGraw-Hill Companies Inc, 1994.
- [3] Rakhmadian, Hilman., *“Analisis Stabilitas Transien dan Mekanisme Pelepasan Beban di PT. Pupuk Kalimantan Timur Pabrik 5 (PKT-5), 2013.*
- [4] Stevenson, W.D., Jr and Granger, J.J., *“Elements of Power System Analysis, 4th Edition”*. McGraw-Hill, Inc, 1994.
- [5] Marsudi, Djiteng, *“Operasi Sistem Tenaga Listrik”*, Yogyakarta : Graha Ilmu, 2006.
- [6] IEEE, *“Guide for Abnormal Frequency Protection for Power Generating Plants”*, 1987. IEEE Std C37.106-2003 (Revision of ANSI/IEEE C37.106-1987).
- [7] IEEE, *“Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality”*, 1995. IEEE Std 1159-1995.
- [8] Saadat, H., *“Power System Analysis”*, McGraw-Hill, Inc, 1999  
Transactions on Power system , Vol. 19, No. 2, May 2004.
- [9] Penangsang, Ontoseno. *“Diktat Kuliah Analisi Sistem Tenaga Listrik 2”*, Jurusan Teknik Elektro, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya
- [10] Das, J.C., *“Transient in Electrical System, Analysis ,Recognition, and Mitigation“* , McGraw-Hill, Inc, 2010.
- [11] Aji, Waskito, *“Analisis Kestabilan Transien di PT. PUSRI Akibat Penambahan Pembangkit 35 MW dan Pabrik P2-B Menggunakan Sistem Synchronizing Bus 33 KV”*, 2014.
- [12] Prahadi, Chafid, *“Analisis Kestabilan Transien dan Mekanisme Pelepasan Beban Pada PT. Pertamina Refinery Unit V Balikpapan”*, 2014

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

## BIODATA PENULIS



**Indra Setiono**, dilahirkan di Surabaya, Jawa Timur pada 31 Desember 1991. Penulis memulai jenjang pendidikan di SD Katolik Untung Suropati 2 Sidoarjo, kemudian dilanjutkan di SMP Katolik Untung Suropati Sidoarjo, dan SMA Negeri 1 Sidoarjo hingga lulus pada tahun 2010. Pada tahun yang sama penulis melanjutkan pendidikan ke jenjang perguruan tinggi di Teknik Elektro Institut Teknologi Sepuluh Nopember melalui jalur Ujian Masuk Mandiri. Selama kuliah, penulis aktif sebagai panitia dalam even besar seperti LCEN 2013. Penulis dapat dihubungi melalui email [indra.setionoh@gmail.com](mailto:indra.setionoh@gmail.com)

*Halaman ini sengaja dikosongkan*